Krankenhaus Berlin-Wilmersdorf, Achenbachstr. 16

Allgemeine technologische Ursachen der Sport- und Arbeitsschäden

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der

Medizinischen Doktorwürde

an der

Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Berlin

vorgelegt von

Julius Gram

aus Wanne-Eickel i. W.

Tag der Promotion: 11. November 1938

1938

Druck: Triltsch & Huther, Berlin O 17

M 333

Gedruckt mit Genehmigung

der

Medizinischen Fakultät der Universität Berlin

Dekan: Prof. Dr. med. Richard Siebeck

Referent: Prof. Dr. med. Wilh. Baetzner

Korreferent: Prof. Dr. med. Paul Rostock

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Über die Entstehungsweise der Sport- und Arbeitsschäden und über die ursächlichen Faktoren herrscht heute noch immer ein Meinungsstreit. Die eine Gruppe von Autoren macht hauptsächlich das „Trauma" für die Entstehung der Sport- und Arbeitsschäden verantwortlich. Man faßt dabei den Begriff „Trauma" sehr weit. Man spricht von sogenannten „inneren Traumen", die durch Fehlfunktion der Gelenke entstehen können, ohne klinisch bemerkbare Erscheinungen und Funktionsstörungen des Gelenks zu hinterlassen. Burckhardt nennt diese inneren Traumen auch „larvierte Traumen", die sich von den echten Traumen durch ihre Symptomarmut unterscheiden. Nach Knoll kommen bei den sportlichen Veränderungen Traumen in weitestem Sinne in Frage, kleine Traumen z. B., die bei jeder körperlichen Tätigkeit entstehen können, deren man sich aber nicht bewußt wird. Bei vielen Sportarten z. B. Fußball, Rugby, Jiujitsu, Boxen, Reiten, Tennis usw. seien „unterschwellige Traumen" am Werke. Er wendet sich gegen die Auffassung Baetzners indem er schreibt: „Auch die Sportschäden, wie Baetzner sie genannt hat, möchte ich aus diesen Gründen zu den traumatischen Einwirkungen in Beziehung setzen." Er hält die Schädigungen für eine Folgeerscheinung zahlreicher unterschwelliger Traumen, die sich nach und nach summieren und am Orte des geringsten Widerstandes angreifen. Den konstitutionellen Momenten und erbgebundenen Stoffwechselstörungen und dem Gesamtzustand des Körpers während der Ermüdung und des Übertrainings räumt er ein großes Feld ein. Zu diesen Ansichten bekennen sich im allgemeinen noch andere z. B. Gebhardt, Matties und Hoske.

Die Untersuchungen durch Heiß an 159 Sportsleuten, deren Ergebnisse nach Ansicht des Untersuchers zugunsten der Baetznerschen Auffassung sprechen, werden von Knoll dahin gedeutet, daß diese Schädigungen Folgeerscheinungen bereits früher stattgehabter Gelenksverletzungen seien und durch Konstitution, ererbte Anlagen, Zusammenspiel der Drüsen, Infektionen und alle möglichen Traumen begünstigt worden seien.

Baetzner hingegen erklärte als Erster, es gäbe Gelenkschädigungen, die lediglich durch falsche und gehäufte Funktion und durch Überbeanspruchung hervorgerufen worden seien. Es werde bei der Übung auf Höchstleistung die Reservekraft des Körpers unter Umständen herabgesetzt und somit der physiologische Abnutzungs- und Regenerationsprozeß gehemmt. Somit käme es zu einer funktionellen und anatomischen Schwächung des Gewebes. Baetzner prägte direkt den Ausdruck „Pathologie der Funktion". Er faßt die destruierenden Momente, die den Sport- und Arbeitsschäden vorausgingen, nicht als Traumen auf. Die Vorgänge, die bei den Sport- und Arbeitsschäden eine Rolle spielen sind nach Baetzners Auffassung nicht Traumen, sondern es handelt sich um „funktionsbedingten, degenerativen Schaden". Es sei hier bemerkt, daß Baetzner, wenn er von Trauma spricht, sich streng an die unfallgesetzgeberische Formulierung des Begriffs hält, um die Bedeutung des Begriffs nicht zu trüben. Bei der Entste-

hung dieser degenerativen Prozesse sind nach Baetzner „alltägliche, betriebsübliche Gelenkbeanspruchungen" am Werke, z. B. „in die Knie gehen, sich aus knieender Stellung aufrichten, geringe Kreiselungen, seitliche Knick- und Kippbewegungen, usw.", Pendeln, Kreiselungen und Rotation der Arme, Abduktion und Adduktion, Strecken und Beugen im Ellbogengelenk, das Spiel der Hand im Handwurzelgelenk usw. Er wendet sich dagegen, daß Dinge zu Traumen gemacht werden, die lediglich „biomechanische oder funktionsmechanische Vorgänge und Bewegungsabläufe" seien. Der eigentliche Traumabegriff sei etwas anderes als der Begriff des Sport- und Arbeitsschadens. So kommt Baetzner zur Formulierung des neuen Begriffs: „Aktivitätsatrophie". Arbeits- und Sportschäden seien entstanden durch dauernde Einwirkung statisch dynamischer Energien bei durchaus physiologischen und artspezifischen Gelenkbewegungen. Diese Auffassung ist frei von der alten Anschauungsweise, allen solchen Schäden müßten makroskopisch bzw. mikroskopisch eklatante traumatische Ereignisse vorausgehen. Wir können uns sehr wohl vorstellen, daß durch derartige Gewebsbeanspruchungen, wie sie oben geschildert wurden, es zu einer Schädigung kommen kann, die tief in das zellbiologische Geschehen eingreift, das Gleichgewicht der Zelltätigkeit stört und schließlich eine pathologische, den Zerfall der Zelle begünstigende Stoffwechseltätigkeit heraufbeschwört mit dem Endergebnis der Sport- und Arbeitsschäden. Rößle schreibt: „Wir wissen heute, daß nicht nur Verrenkungen, Verzerrungen u. a. die Unfallheilkunde und Chirurgie beschäftigende Gelenkverletzungen weitere Erkrankungen nach sich ziehen, sondern daß einfache falsche Beanspruchungen des täglichen Lebens und unterschwellige, aber durch Wiederholung sich summierende Anstrengungen zur Überschreitung der Anpassungsgrenze führen und gefährlich werden können." Müller führt zur Erklärung dieser Vorgänge als ein sehr wichtiges Prinzip der Reaktionsweise des bindegewebigen Apparats gegenüber veränderter mechanischer funktioneller Beanspruchung „den Umbau" an, unter dem er den gleichzeitig nebeneinander verlaufenden An- und Abbau des Gewebes zur Angleichung an die neuen mechanischen Verhältnisse versteht. Er weist daraufhin, daß gerade die „in vieler Hinsicht neuartigen Anschauungen von Baetzner" über die „Pathologie der Funktion" und die von Baetzner auf dem Gebiete der Sportschäden beigebrachten Beispiele dazu dienen, den Prozeß des Umbaus als Reaktion auf die veränderte Funktion näher zu erklären. Müller schreibt: „Gesteigerte Funktion hat gleichzeitig nebeneinander verlaufenden An- und Abbau von neuem Gewebe zur Folge, der bei normalem Gewebe und unverändert bestehendem Regenerationsvermögen, in Anpassung an die gesteigerte funktionelle Beanspruchung, durch Überwiegen der Anbauprozesse zur Hyperthrophie führt. Reichen die Anbauprozesse nicht aus, sei es infolge abnorm gesteigerter Beanspruchung, oder weil die Möglichkeit eines Anbaus aus bestimmten anatomischen Gründen oder infolge krankhafter Zustände mangelhaft ist oder vollkommen fehlt, dann sehen wir als Folge vermehrter Funktion in solchen Fällen anstatt einer funktionellen Hypertrophie gerade das Gegenteil, die Schädigung des Gewebes. In dieser Hinsicht vermögen gerade die Erfahrungen der Sportschädigungen wertvolle Belege zu liefern. Mit dem Begriffe des „Umbaus" als Folge gesteigerter Funktion, den ich hier im wesentlichen für das Stützgewebe entwickelte, der jedoch

noch viel allgemeiner Geltung haben dürfte, finden aber die Erfahrungen und Beobachtungen einer „Pathologie der Funktion", wie ich glaube, einheitliche Deutung." — Wachsmuth äußert in seiner Abhandlung: „Über Dienstschäden am Bewegungsapparat" über die ursächlichen Faktoren die gleichen Ansichten wie Baetzner auf dem Gebiete der Sport- und Arbeitsschäden. — Die Pathologie der Funktion gehöre zu den aktuellsten und zugleich umstrittensten Gebieten der Chirurgie. Zum Begriff des Sport-, Arbeits- oder Dienstschadens gehöre das Fehlen jeglichen Traumas. Die Schädigung würde dadurch herbeigeführt, daß passives und aktives Stützgewebe infolge Dauer, Intensität, Art und Mechanik der Einwirkung sich anatomisch und funktionell nicht anpassen können. Die Schäden seien schon lange beobachtet. Aber diese Ansicht über ihre Entstehung sei neu. Diese Frage sei gerade heute in der Zeit des Sports und der straffen militärischen Erziehung von Wichtigkeit; denn es käme gerade jetzt, wo die Schäden bei der starken Beanspruchung des Bewegungsapparats im Heer, im Soprt und in den einzelnen Formationen sich häufen, darauf an, rechtzeitig zu erkennen und, wo möglich, zu verhüten. — Wachsmuth stimmt mit Baetzner voll überein, daß schon kleine und kleinste Arbeitsverrichtungen zur Materialverschlechterung des menschlichen Gewebes genügen, im Gegensatz zur Auffassung von Gebhardt und Knoll, daß die Ursache in einem nicht zum Bewußtsein gekommenen Trauma zu suchen sei. Wachsmuth fand, daß die Veränderungen am Knorpel und Knochen infolge des Marsch- und Exerzierdienstes immer dort am stärksten waren, wo die statisch-dynamischen Vorgänge sich häuften.

Andere Autoren nehmen eine zwischen beiden Ansichten vermittelnde Stellung ein. Magnus äußert sich z. B. bezüglich der Meniscuserkrankungen, man sage besser „Meniscusschaden", um das „nur Trauma" auszuschließen. Man müsse zwischen traumatischen und nichttraumatischen Meniscusschäden unterscheiden, denn es gäbe durch mechanische Beanspruchung entstandene Schäden. Blenke gibt teilweise der Ansicht Knolls recht, indem er sagt, es gäbe eine ganze Reihe von Schäden, die durch kleine und kleinste Traumen verursacht seien. Andererseits erweitert er die Anschauung Baetzners, die Schäden lägen innerhalb der Sportschadenbreite der Höchstleistungskurve. Baetzner stellte nämlich ein Kurvenbild von Leistungsgraden auf, und zwar stufte er nach normaler Leistung ohne sportliche Betätigung, mittlerer Leistungsfähigkeit, Höchstleistung und Übertraining ab. Blenke behauptet, daß zweifellos die Rekordleute und einseitig spezialisierten Meisterschaftskämpfer ein großes Kontingent an Sportschäden lieferten, daß aber auch mindertrainierte, weniger leistungsfähige Sportler wie Fuß- und Handballer durch ständige Beanspruchung bei allsonntäglichen Spielen sich solche Schäden zuzögen. — Das sei in gewisser Weise eine Erweiterung der Ansicht Baetzners.

Röllgen untersuchte auf Veranlassung von Baetzner im Institut von Ceelen eine Reihe durch Operation gewonnener Kniegelenkmeniscen. Inwieweit traumatische Ursachen und inwieweit Überbeanspruchung mitsprächen, ließe sich nur vermuten. Es seien aber wahrscheinlich „die ungewöhnlichen statischen Belastungsverhältnisse und die über das gewöhnliche Maß gesteigerten normalen Belastungsreize namentlich bei jugendlichen, noch nicht ausgewachsenen Meniscen", die diese Schäden verursachten.

Um einen Einblick in die Vorgänge, die zur Schädigung des menschlichen Gewebsmaterials führen, zu bekommen, war es nötig, sich der Erfahrungen und Feststellungen zu bedienen, die bei den Festigkeitsprüfungen in der Technik an totem Material, also an Werkstoffen und Baumaterialien, gewonnen worden waren. Man hielt sich methodisch und instrumentell an die Erfahrungen der Materialprüfungsämter. Man ist sich aber immer darüber klar gewesen, daß man die an Werkstoffen gewonnenen Erfahrungen nur mit Vorsicht auf lebendes Gewebe übertragen darf. Diese Vorsicht liegt ganz einfach in dem Unterschied zwischen totem und lebendem Material schlechthin begründet. Man hat es daher auch nicht unterlassen, vielfache Materialprüfungen am Gewebe anzustellen, z. B. am Bindegewebe, Muskel, Knorpel, Knochen, Blutgefäß. Die Vorgänge sind zum großen Teil noch problemhaft. Das krankmachende Geschehen, das sich bei hier in Frage kommenden Schädigungen abspielt, scheint zutiefst in das molekulare Gleichgewicht des Zellprotoplasmas und aller übrigen am Gewebe beteiligten Substanzen einzugreifen. Es ist schwer, die Vorgänge in ihrem Ablauf zu beobachten und festzuhalten. „Verhärtung und Erweichung, übermäßige und untermäßige Dehnbarkeit und Zerreißlichkeit sind Zustandsänderungen der Gewebe, für die wir durchaus nicht immer mit dem Mikroskop und spezifischen Färbemethoden Aufklärung erlangen können" (Rössle). Selbst die zur Prüfung benutzten Gewebsstücke scheinen, da sie ja aus der Gesamtheit des lebenden Körpers herausgelöst wurden, kein genaues Bild der Vorgänge, wie sie sich beim Gewebe, das mit dem Ganzen des Körpers in Zusammenhang steht, zu geben. Dennoch liegt es nahe und in der Natur der Sache begründet, daß man sich immer wieder bemüht, am fügsamen und ohne Schwierigkeit zur Verfügung stehenden toten Material Erfahrungen zu sammeln und zu verwerten, indem man wichtige Parallelen zum Geschehen am menschlichen Gewebe herauszufinden versucht. Henschen ist der Ansicht, man könne über diese Dinge nur Klarheit gewinnen, wenn man die an den Werkstoffen und Baumaterialien gemachten Erfahrungen zum Studium der Vorgänge am organisch belebten Material heranzöge.

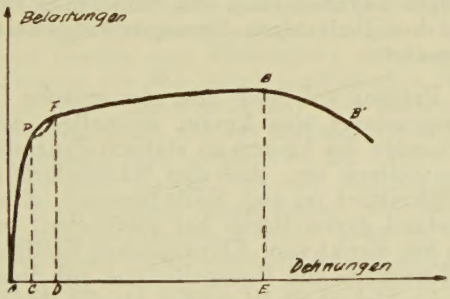
Wenn wir die statischen und dynamischen Vorgänge, die zu den Gewebsdegenerationen im Sinne der Sport- und Arbeitsschäden führen können, in ihrer allgemeinen Wirkungsweise begreifen wollen, müssen wir uns die wichtigsten Grundbegriffe der Festigkeitslehre vor Augen führen. Henschen berichtet in der „Schweizerischen Medizinischen Wochenschrift", Jahrg. 1929, 2. Teil, über wichtige Erkenntnisse auf diesem Gebiete. Wird menschliches Aktiv- und Passivgewebe Belastungen ausgesetzt, so wird es im Wesentlichen auf 3 Festigkeitsarten erprobt, nämlich auf die

1. statische Festigkeit
2. Stoß- und dynamische Festigkeit
3. Betriebs- und Arbeitsfestigkeit.

1.) Unter statischer Festigkeit versteht man den Kohäsionswiderstand, den ein Material gegen eine einmalige, von Null an langsam und allmählich zunehmende, also nicht stoßartig erfolgende Belastung, die als Druck oder Zug wirkt, aufbringt. Bei der Prüfung auf statische Festigkeit beobachtet und berechnet man einerseits die Gestaltsveränderungen des erprobten Materials. Die Spannungen nennt man in

der Technik „Drang", die Formveränderungen „Zwang". Die wirksamen Spannungen und die entstehenden Deformationen stehen in einem bestimmten Verhältnis, welches sich bei steigenden Belastungen von bestimmten Belastungsstufen ab ändert. Dieses Verhältnis wird ausgedrückt durch das Hook'sche Gesetz. Dieses sagt, daß die Formveränderung oder „Dehnung" sich proportional zur Spannung verhält. Das Gesetz hat aber nur bis zu einer bestimmten Belastungsgrenze Gültigkeit. Diese Grenze nennt man „Proportionalitätsgrenze", die nach Galka folgendermaßen definiert wird: „Die Elastizitätsgrenze (Elastizitäts- und Proportionalitätsgrenze sind praktisch identisch) ist diejenige Belastung, bis zu der die bleibenden Formveränderungen so klein sind, daß man den Körper als vollkommen elastisch auffassen kann." Elastizität selbst ist die Eigenschaft der Körper, die durch Krafteinwirkung hervorgerufene Formveränderung wieder aufzugeben. — Jenseits dieser Grenzen nimmt die Dehnung ungleich mehr zu, als der Belastung entspricht. Man sagt dann: „das Material fließt". Der Augenblick, in dem das Fließen voll in Gang kommt, heißt: „Fließ- oder Streckgrenze". Schließlich wird bei weiterer Belastung ein Punkt erreicht, bei dem der Werkstoff bricht. Das ist die „Bruchgrenze". Eine graphische Darstellung dieser Vorgänge, die dem Buche Galka's entnommen ist, gibt diese Vorgänge in anschaulicher Weise wieder (Abb. 1).

Abb 1



Spannungs - Dehnungs-Diagramm
oder Formveränderungskurve
(nach Galka)

Der Kurventeil AP liegt innerhalb des Gebiets, in dem das Hook'sche Gesetz Gültigkeit hat. Von der Belastungsgröße PC ab beginnt das Material zu fließen. Bei F ist das Fließen in vollem Gang (Fließgrenze). B ist die Bruchgrenze. Das Material hat seine größte Belastungsmöglichkeit erreicht. (B = Bruchgrenze, BE = Bruchfestigkeit.) Hier aber erfolgt noch nicht der Bruch, sondern erst in B', obwohl hier die Spannung geringer ist als in B. Das hängt mit der durch das Fließen bedingten Änderung des Querschnitts des Materials zusammen. Diese Grundbegriffe gelten für alle mit den verschiedensten Eigenschaften ausgestatteten Werkstoffe, ganz gleich ob sie spröde, formbar, bildsam oder zäh-bildsam sind. Außerhalb der Elastizitätsgrenze ist bei nicht dichtbaren Körpern von der Einwirkungskraft die

sogenannte „innere Reibung", die durch den Kohäsionswiderstand gegeben ist und in der Wirkungsrichtung durch Druck stärker und durch Zug geringer wird, zu überwinden. Schließlich wird eine bleibende Formveränderung und somit ein neues Gleichgewicht erreicht.

Versuche mit statischer Belastung am Gewebe ergaben, daß schon bei mehrstündiger Beanspruchung mit solchen Belastungen ein Bruch erzielt wurde, die bei kurzfristiger Einwirkung das Material nicht zu Bruch brachten. Was der Belastung an Größe mangelt, wird durch die Zeit bei der statischen Belastung wieder gut gemacht. „Die Zeit wirkt wie die Verstärkung der Belastung" (Henschen). Man fand, daß bereits bei einer Einwirkungszeit von 3 Tagen nur $^2/_3$ der mittelbaren Bruchbelastung nötig war.

Die reine statische stoßfreie Belastung kommt in reiner Form im funktionsmechanischen Geschehen des Bewegungsapparats nur selten vor und zwar nur dann, wenn in Ruhelage die Elastizitätskräfte der das Gelenk umgebenden Gewebe sich das Gleichgewicht halten, wenn nur der Sperrtonus im Sinne von Uexkülls wirkt bei völlig schlaffen Muskeln, in welchen letzteren dabei nicht der geringste Aktionsstrom nachweisbar ist" (Henschen). Die Muskeln haben im allgemeinen eine „veränderbare Ruhelage", die sich dem Skelettsystem mitteilt. Jeder Vorgang in der Muskulatur, jede Kontraktion, Versteifungs- oder Haltungsinnervation und jeder Außenwelteinfluß wird auf die Gelenke und die Knochen übertragen und stört die rein statische Beanspruchung des Knorpels und des Knochens. Der arbeitende, sich bewegende, in ständiger Lageänderung sich befindende Bewegungsapparat wird bedeutend komplizierteren Beanspruchungsweisen als der rein statischen ausgesetzt.

2. Bei der Prüfung auf Stoß- oder dynamische Festigkeit ist die wirksame Beanspruchung eine kurze, einmalige oder wiederholte, stoßweise einsetzende. Sie kommt im statisch-dynamischen Geschehen des Organismus vielfach vor. Auf den Materialprüfungsämtern prüft man diese Festigkeitsart im sog. Schlagversuch, d. h. man prüft den Kohäsionswiderstand gegen Bruch bei plötzlicher, ruckweiser Beanspruchung. Man hat direkt von „Chirurgischer Festigkeit" gesprochen, weil viele der Knochen- und Knorpelbrüche auf diese Weise entstehen. Die statische Sicherheit ist größer als die dynamische. Bei der stoßweisen Belastung nämlich ist das ganze Maß der Kraft in voller Ausdehnung nur in einem minimalen Zeitraum wirksam. Man könnte fast sagen, daß das, was an Zeit mangelt, durch Kraft ersetzt werden muß. Es wechseln bei dieser Beanspruchungsweise Phasen der Belastung abrupt mit Phasen der Entlastung. Der beanspruchte Körper gerät ins Schwingen, „in eine Aufeinanderfolge wechselnder Formveränderungszustände" (Henschen). Diese Schwingungen werden nach Absetzen der einwirkenden Kraft von inneren und äußeren Widerständen im Sinne einer Abschwächung beeinflußt. Sie verlieren sich schließlich völlig und der Ruhezustand ist wiederhergestellt. Plötzlich einwirkende Belastung beansprucht den belasteten Körper gewöhnlich fast doppelt so stark wie gleichgroße, statisch wirkende, d. h. ruhende Belastung. Zähe Stoffe vertragen am besten solche plötzlichen, unmotiviert auftretenden Beanspruchungen. So ist der Knorpel als zäh-bildsame Masse das ideale Material zum Abfangen und Verarbeiten solcher dynamischen Krafteinwirkungen, die sich ja ge-

rade in den Gelenken häufen. Der Knorpel leidet von allen Körpersubstanzen am wenigsten unter dieser Art der Beanspruchung.

3. Unter Betriebs- und Arbeitsfestigkeit versteht man die Festigkeit eines Stoffes gegenüber veränderlichen, langdauernden Einwirkungen. Die hier wirksamen Beanspruchungen ahmt man bei den Festigkeitsprüfungen in der Weise nach, daß man Dauerversuche mit geringeren, aber oft wiederholten Belastungen anstellt (mit Kruppschem Dauerschlagwerk). Die als „Zug oder Druck, wechselnder Zug und Druck, einseitige Biegung, Hin- und Herbiegung, Verdrehung oder in mannigfacher Verknüpfung aller dieser Belastungsarten durchgeführte Beanspruchung wird in Form von Schlagwirkungen durch rhythmische Stöße oder von stoßfrei schwingenden Beanspruchungen mit besonderen Apparaten und Maschinen ausgeübt" (Henschen). — Wir unterscheiden bei dieser Festigkeitsart einige Unterarten:

1. die Spannung wechselt zwischen 0 und einem häufig erreichtem Maximum. Die Spannungshöhe, die bei beliebig oft durchgeführtem Spannungswechsel an der Grenze des Ertragbaren, also in der Nähe der Bruchgrenze liegt, heißt „Ursprungsfestigkeit".

2. Der Spannungsspielraum kann liegen

a) zwischen positivem Minimum und positivem Maximum;
b) zwischen negativem Minimum und positivem Maximum;
c) zwischen entgegengesetzten Grenzwerten von alsolut gleicher Größe.

Der Grenzwert dieser „Schwingungsbeanspruchungen", der bei beliebig oft wiederholtem Spannungswechsel vom Material eben noch ausgehalten wird, heißt „Schwingungsfestigkeit". Für die Technik ist die Bestimmung dieser Grenze von Wichtigkeit, denn man muß wissen, bis zu welcher Grenze ein Werkstoff wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt werden darf. Man ermittelt die Schwingungsfestigkeit, indem man das Material nicht wie bei statischen und Schlagversuchen gleich zu Bruch kommen läßt, sondern es mit zahlreichen Lastwechseln bearbeitet und zwar nur mit solchen Anstrengungen, die nicht gerade bis an die Bruchgrenze heranreichen. Der Körper muß diese Spannungen millionenmal ertragen können, ohne zu brechen. — Das Aktiv- und Passivgewebe im Prozeß der Arbeit und des Sports wird hauptsächlich auf diese Betriebs- und Arbeitsfestigkeit insbesondere auf Schwingungsfestigkeit beansprucht. Es schalten sich in den „vibratorisch-oszillatorischen" Zustand des Bewegungsapparates während der muskelaktionsfreien Phase alle möglichen anderen Beanspruchungsarten hinein, z. B. rein statische Beanspruchung von kürzerer oder längerer Dauer, dynamische, plötzliche Stöße und Erschütterungen, plötzliche Hemmungen, Aufpropfung neuer Belastungen, jäh wechselnde Be- und Entlastung usw. Die schädigende Wirkung solcher Erschütterungen hat man an Zellen und Protozoen bereits nachgewiesen. Man fand teils erregende, teils lähmende Wirkung (Wachstumshemmung der Bakterien). Rhythmisch wiederholte Stöße summierten sich und führten zu mechanischem Tetanus (Amöben nehmen Kugelform an). Beim Gelenkknorpel kann die schwingende Beanspruchung einer gleichbleibenden ruhenden überlagert sein.

Die statische oder ursprüngliche Elastizität ist unter bestimmten Bedingungen veränderlich. Die Verschiebung der Proportionalitäts-

bzw. Elastizitätsgrenze wird erreicht durch einen in bestimmten Grenzen auf das Material einwirkenden Spannungswechsel, indem also die Belastung zwischen bestimmten Grenzen schwingt. Die auf diese Weise verschobene Elastizitätsgrenze nennt man im Gegensatz zur statischen die „natürliche" Elastizitätsgrenze. Man kann sie praktisch mit der Ermüdungs- oder Dauerbruchgrenze identifizieren. Je nach der Qualität der Belastung kann die ursprüngliche Elastizitätsgrenze nach oben oder unten verschoben werden. Schwingungen zwischen O und einer an die Elastizitätsgrenze heranreichenden Belastung erhöhen die Elastizitätsgrenze. Druck oder Zug durch eine die Elastizitätsgrenze überschreitende Kraft erniedrigt die Elastizitätsgrenze für die entgegengesetzte Beanspruchung für immer. Allmählich anwachsende Belastung im Sinne von Druck oder Zug senkt die Elastizitätsgrenze erst dann, wenn sie über die statische Elastizitätsgrenze hinauswächst. Die Schwingungsfestigkeit liegt unterhalb der Proportionalitäts- bzw. Elastizitätsgrenze und ist, den Erfahrungen gemäß, mehr von der Elastizitätsgrenze als von der Bruchfestigkeit abhängig. Ein Materialbruch läßt sich durch vielfach wiederholte Schwingungen zwischen bestimmten Spannungsgrenzen von denen keine die absolute statische Bruchfestigkeit erreicht, erreichen. Der lebende Knochen z. B. ist sehr vielen Schwingungsspannungen ausgesetzt. Die Schwingungen werden teils durch die rhythmische Oszillation des arbeitenden Muskels, teils durch die Vibration der Blutwelle und teils durch die Erschütterungen bei der Fortbewegung erzeugt. Diese Stöße und Erschütterungen, die vielfach auf den Körper einwirken, werden durch ein sehr fein wirkendes Sicherungssystem in stoßfreie Schwingungen umgewandelt. Bei sportlicher, militärischer und beruflicher Übernützung traten vor allem bei jugendlichen und untrainierten Individuen nach Überschreitung der Anpassungs- und Gewohnheitsgrenze bei Ausschaltung hinreichend langer Erholungspausen Zustände von Ermüdung des Aktiv- und Passivgewebes auf. Gesellen sich zur stoßfreien Schwingungsbeanspruchung unmotivierte Stöße und Erschütterungen, so steigt die Bruchgefahr des Materials, die noch größer wird, wenn es zu Deformierungen, Lückenbildung und Querschnittsänderung kommt. (Lockerung der Befestigungseinrichtungen, Schleudern und Schlagen der Maschinen!) Schwingungsbrüche am Knochen sind z. B. oft spontan auftretende Frakturen des Ober- und Unterschenkels oder der Metatarsen während des Marsches übertrainierter Soldaten (Infanteristen), ferner die plötzlich ohne erklärbare Ursache auftretenden Muskelrisse bei Sportlern, Sehnenrisse bei Läufern, Trommlern usw. Derartige Gewebebrüche sind der letzte Akt in einem schon länger bestehenden Prozeß eines sich entwickelnden, langsam fortschreitenden Vibrationsbruchs.

Ein für das Verständnis der degenerativen Prozesse des Aktiv- und Passivgewebes, der Erschöpfungschondrosen- und Arthrosen usw. wichtiger Begriff ist der der „Materialermüdung". Wir verstehen darunter eine im Laufe von Dauerbeanspruchungen eintretende Verminderung der Widerstandsfähigkeit Belastungen gegenüber, also eine eigentümliche Krankheitserscheinung der Materialien. Man nahm als Ursache dieser Erscheinungen Änderungen im kristallinischen Aufbau an, ferner „diskontinuierliche, sehr feine Spalten und Lücken im Inneren", Unebenheiten der Oberfläche, oder mikroskopisch feine Verletzungen. die eine Spannungserhöhung bedingen und Ausgangsstelle

des Bruchs sind, der dann mehr und mehr vorrückt, den Querschnitt verringert, bis schließlich ein plötzlicher Materialbruch erfolgt. Das alles steht mit der Theorie Baetzners vom traumalosen Geschehen im Einklang. Bei der lebendigen physiologischen Funktion des Bewegungsapparats sind Kräfte am Werke, die längst nicht ausreichen, grobsichtbare Traumen zu setzen, die aber dennoch das Gewebe in seiner Qualität derart schädigen, daß es schließlich zu Veränderungen im Sinne der „Sport- und Arbeitsschäden" kommen muß.

So, wie es einerseits die Erscheinung der „Ermüdung" gibt, kennen wir andererseits den Prozeß der „Heilung". Die vorübergehend im Dauerversuch verlorengegangene Elastizität kehrt, wenn man das Material entlastet und ausruhen läßt, wieder. Das ist z. B. bei Materialien der Fall, die im statischen Langversuch oder im Dauerschwingungsversuch überlastet werden. Es ist ja eine Erfahrung der Technik, daß Apparate und Maschinen nach reichlichem Gebrauch zum Ausruhen stillgestellt werden.

Unter „Altern des Materials" versteht man eine Erscheinung, die sich in einer allmählichen Veränderung der Festigkeitseigenschaften hauptsächlich hinsichtlich der Sprödigkeit äußert. Das ist auch bei dem Gewebsmaterial der Fall. Man spricht von „Altern der Gele". Es tritt eine physikalisch-chemische Zustandsänderung auf. Der Knorpel wird z. B. unter diesen Vorgängen härter, zäher, poröser, weil der physiologische geregelte Wechsel zwischen Belastungsentquellung und Entlastungsquellung gestört ist. Es findet auf diese Weise ein Wasserentzug statt. Die Elastizität der Gelenke läßt nach. Das Dispersionsmittel wird nicht mehr völlig aufgenommen, das ursprüngliche Volumen wird deshalb nicht mehr erreicht.

Was ist Hysteresis? — Entlasten wir ein elastisches Material, so zeigt sich, daß eine elastische Nachwirkung, d. h. eine Verzögerung der elastischen Deformation und ein Unterschied in der Gleichgewichtslage bei Be- und Entlastung unterhalb der Elastizitätsgrenze (elastische Hysteresis) auftritt. Wenn bei Belastung eines Körpers das Hook'sche Gesetz wirksam sein soll, so muß also einer bestimmten Belastung auch eine ganz bestimmte Dehnung oder Deformation entsprechen, oder wenn wir den Vorgang umgekehrt betrachten, der jeweiligen Entlastung ein ganz bestimmter Deformationszustand entsprechen. Bei der Hysteresis ist dieses Gesetz gestört. Hysteresisfähige Materialien haben Neigung zu Dauerbrüchen. Die bei den Sport- und Arbeitsschäden des Bewegungsapparates in Frage kommenden Ursachen sind nach Henschen's Ansicht vor allem Beanspruchungen im Sinne der Betriebs- und Arbeitsfestigkeit. In der Phase der Muskelaktion ist der Einfluß auf den Bewegungsapparat hauptsächlich ein vibratorisch -oszillatorischer. In den muskelaktionsfreien Ruhepausen herrschen statische Einflüsse oder dynamische Beanspruchungen in Form von Stößen, Erschütterungen oder plötzlichen Hemmungen vor.

Betrachten wir zunächst die Vorgänge, die sich in den Gelenken am Knorpel abspielen. Es sind zahlreiche Materialprüfungsversuche am Gelenkknorpel gemacht worden. Natürlich entsprechen die Ergebnisse dieser Untersuchungen nur annähernd dem physiologischen Geschehen. Es ist nicht möglich, die natürliche Beanspruchungsweise genau nachzuahmen. Vor allem gilt es, festzustellen, ob nicht schon unterhalb der absoluten Bruchgrenze, bei der es bereits zu sichtbaren

Zerstörungen des Gewebes kommt, nicht grob sichtbare Schäden auftreten. Parallele Vorgänge am toten Material hatten wir schon vorher bei der Erklärung des Begriffs der „Materialermüdung" erörtert. Vor allem sind es Bär und Göcke gewesen, die wichtige Beiträge zur Klärung dieser Fragen geliefert haben. Bär verwandte zu seinen Versuchen 2 Elastometer, von denen das eine im Prinzip dem Instrument von Schade und Mangold, das andere dem ballistischen Maßapparat von Gildemeister entspricht. Er benutzte nicht wie Göcke, ausgeschnittene Knorpelstücke, sondern unversehrte Gelenkknorpel (fixiertes bzw. frisches Sektionsmaterial), um nicht die natürlichen Widerstandssysteme durch Zerschneiden zu zerstören.

Die freien Gelenkflächenknorpel wurden geprüft, indem der Knochen an der Diaphyse in einen Schraubstock gespannt wurde. Beim ersten Apparat wurde ein Pelotte belastet (500 g auf 0,07 qcm). Sie war mit einem Schreibhebel verbunden. Beim Einsenken der Pelotte übertrug sich diese Bewegung auf den Schreibhebel, der den

Abb 2. Typische Belastungskurven der Gelenkknorpels (nach Bär) Gewicht 500 kg. - Pelotte 3mm Durchm.

Vorgang auf einem rotierenden Kymographen registrierte. Je tiefer die Pelotte einsank, desto höher stieg der Schreibhebel. Aus dem entstandenen Kurvenbild, das wir hier hinzufügen (Abb. 2), ergab sich Folgendes: Die Hälfte des Einsinkens der Pelotte in den Knorpel bei Belastung geschah augenblicklich. Dann aber vollzog sich das Einsinken mit geringerem Tempo, d. h. in längeren Zeitabständen. Der Betrag der Deformierung wurde also an der Zeiteinheit geringer. Wir erkennen also 2 Phasen:

I Phase — schnelle Überwindung des Widerstandes,
II Phase — Bremsung der Deformation, Ansteigen des Widerstandes.

Bär erklärt sich diesen Vorgang durch die besondere Struktur des Knorpels, der aus gesetzmäßig angeordneten, durch Hyalin verkitteten Fasersystemen besteht. Bei Belastung kommt es zunächst zu Verschiebungen der Fasern gegeneinander. Schließlich aber geraten die Fasern bei weiterer Verschiebung in Spannung. Es erwächst somit ein größerer Widerstand. Die Deformierung wird gebremst. Der geringere Widerstand im Anfang der Belastung, der sich der Verschiebung der Fasersysteme entgegensetzt, kommt hauptsächlich durch die Kräfte der Adhäsion zustande. Weiter sehen wir, daß die Kurve nach der Entlastung zunächst ein Stück steil abfällt, aber es erfolgt kein völliger elastischer Ausgleich. Der weitere Teil der Kurve in der Entlastungsphase erreicht erst nach längerer Zeit (1/2—1 Stunde)

die Nullinie. Diese Tatsache besagt, daß eine deutliche elastische Nachwirkung nach Belastung des Knorpels vorhanden ist, daß der Gelenkknorpel somit eine schlechte Elastizität besitz. „Die elastische Nachwirkung ist um so größer, je länger die Belastung ausgeführt wurde, je tiefer die Last in dieser Zeit einsinkt" (Bär). Es kommt also bei jeder länger dauernden Beanspruchung zur Schädigung der Elastizität, während bei kurzdauernden, auch wiederholten Belastungen die Eindrücke ausgeglichen werden, die Elastizität des Knorpels also erhalten bleibt. Das steht durchaus im Einklang mit den physiologischen Verhältnissen; denn bei normaler Funktion kommt es im Gelenk zu einer idealen Verteilung der Belastung. „Unsere Unfähigkeit die Bewegungslosigkeit eines belasteten Gelenks auszuhalten, und die reflektorische Nötigung zur Veränderung der Körperstellen zeigen aber, daß die Gelenke auf Wechseldruck gearbeitet sind. Aus der Pathologie der Arthritis deformans und der Gelenkmäuse ist uns bekannt, welche Wirkungen örtlich verstärkt, d. h. unrichtig verteilte Drucke im Gelenk haben. Krankhaft veränderte Gelenkstellen zeigten meßbare Erweichungen" (Rößle: Die mech. Prüfg. menschl. Gew.). Je größer der Druck und je kleiner die Angriffsfläche ist, desto größer wird die Schädigung der Elastizität des Knorpels bei Dauerbelastungen sein. Kurzdauernde Belastungen dagegen sind, wenn sie im Rahmen des Ertragbaren liegen, im gewissen Sinne physiologisch und setzen die Elastizität nicht herab. Eine Verkleinerung der Belastungsstelle erhöht bei gleichbleibender Belastung die Möglichkeit der Elastizitätsschädigung und damit der Schädigung des Gewebes. — Ein praktisches Beispiel dieser Vorgänge haben wir in den Schädigungen des Kniegelenks namentlich beim Bergarbeiter; denn die typische Haltung des Bergarbeiters beim Arbeiten im niedrigen Flöz ist die extreme Beugung im Kniegelenk und Außen- und Innenrotation der Unterschenkel. Darauf weisen auch Remmer-Andreesen, Bochum, in dem Artikel: „Das reizempfindliche Kniegelenk unter besonderer Berücksichtigung der Meniscusschäden der Bergleute" hin. Bei extremer Beugung wird der hintere Pol der Kondylen auf die Gelenkfläche gerollt. Die Belastungsfläche aber ist in dieser Stellung eine kleinere, da es zu einer gewissen Inkongruenz zwischen Tibia- und Kondylengelenkfläche kommt. In Streckstellung liegen die Kondylen mit der weniger gekrümmten Gelenkfläche auf und es besteht eine bessere Kongruenz zwischen Tibiagelenkfläche und Kondylengelenkfläche. Es kommen natürlich noch andere schädigende Momente, gegeben durch das Verhalten der Menisci, hinzu. Bei der starken Beugung werden die Menisci nach hinten gewalzt. So kommt es einerseits zur Einklemmung des hinteren Meniscuspols, andererseits zur Zerrung an der vorderen seitlichen Ansatzstelle der Menisci an die Kapsel. Wichtig ist, daß die pathologische Beanspruchung des Gelenkes in dieser Stellung bei dieser Arbeitsweise eine verhältnismäßig lang andauernde ist. Oft arbeitet der Bergmann in dieser Weise 8 Stunden, ohne zwischendurch für längere Zeit die Körperstellung zu wechseln und eine andere Arbeit aufzunehmen. So kommt es verhältnismäßig früh bei solchen Arbeitern, die noch vielen anderen den Bewegungsapparat schädigenden Momenten ausgesetzt sind, zu degenerativen Veränderung der knorpeligen Anteile des Gelenks, namentlich der Menisken, mit Verlust der Elastizität, mit Auffaserung, Zerklüftungen, Erweichungen, Auflösung der Knorpelgrundsubstanz, Zellwucherun-

gen, ferner zu Arthritis-deformans-ähnlichen Erscheinungen, freien Gelenkkörpern usw.

Eine andere Versuchsweise stellte Bär mit dem Gildemeisterschen ballistischen Elastometer an. Das Prinzip, das diesem Apparat zugrunde liegt, ist folgendes: Schlägt ein schwingendes Pendel mit einer Kugel am unteren Ende versehen (hier mit einem Hämmerchen am unteren Ende) auf einen zweiten Körper, so wird die Kugel wieder abgestoßen, und zwar je nach der Elastizität dieses Körpers langsamer oder schneller. Die Stoßzeit (Dauer der Berührung zwischen Kugel und Körper) wird durch eine Stromschließungsanordnung für die Zeit der Berührung gemessen. — Man fand auf diese Weise, daß der Gelenkkopf härter war als die Gelenkpfanne. In der Mitte der Pfanne war der Knorpel am weichsten, nahm zum Rande hin an Härte zu. Bei den einzelnen Gelenken ergaben sich hinsichtlich der Elastizitätswerte, die in Skalenteilen gemessen wurden, einige Unterschiede. Nach Entfernung der Knorpeldecke der Gelenkenden prüfte man auch die entsprechenden Knochenstellen. Die Prüfung ergab bei weitem nicht solche Elastizitätsunterschiede wie beim Knorpel zwischen zwei extremen Knorpelstellen. Durch Wasserentziehung (Alkoholfixierung) gelang es, sowohl hyaline wie auch faserknorpelige Stellen härter zu machen. Tränkte man sie wieder mit Wasser, so erreichten die hyalinen Teile ihre ehemaligen vollen elastischen Eigenschaften wieder. Der faserige Anteil dagegen blieb härter, erreichte also nicht mehr den Zustand vor der Wasserentziehung. Bär fand weiter, daß alle Abweichungen vom gewöhnlichen Bau des Knorpels (normal vorkommende oder pathologische im Sinne einer faserigen oder gallertigen Erweichung) eine Änderung der Elastizität, eine Erweichung bedingen. Weiter oben wurde bereits erwähnt, daß lang andauernde Belastungen und Dauerbeanspruchungen einundderselben Stelle in den Gelenken am lebenden Körper nicht vorkommen. Schon subjektiv würde ein solches Beharren nach kurzer Zeit als unangenehm empfunden. Aber auch die besondere Struktur der Gelenke — indem sich nämlich der Gelenkkopf in das entsprechende Negativ der Gelenkpfanne einfügt — sorgt dafür, daß im allgemeinen Druckverlagerung auf relativ kleiner Gelenkflächenabschnitte nicht vorkommt. Im Arbeitsprozeß und beim Sport wird der Mensch durch die Verhältnisse häufiger genötigt, einerseits die erlaubte Belastungsdauer der Gelenke oder der Gelenksteile zu überschreiten, andererseits durch überstarke und überhäufige Ausführung von Bewegungsabläufen extreme Gelenkstellungen einzunehmen und so die Last auf exzentrisch gelegene Gelenkflächenteile zu verlagern, so daß ein großer Teil der zur Verfügung stehenden Gelenkfläche der Last enthoben und der belastete Teil kompensatorisch überlastet wird. Eine Schädigung ist unter diesen Umständen mit der Zeit unausbleiblich.

Die Versuche Bärs ergaben weiter, daß die Gelenkpfannen im allgemeinen weicher sind als die Köpfe. Der mittlere Wert des höchsten Ausschlags betrug z. B. bei

1. Femurkopf 5,3 mm, Hüftpfanne 8,2 mm
2. Kondylen 4,9 mm, Tibiapfanne 5,2 mm.

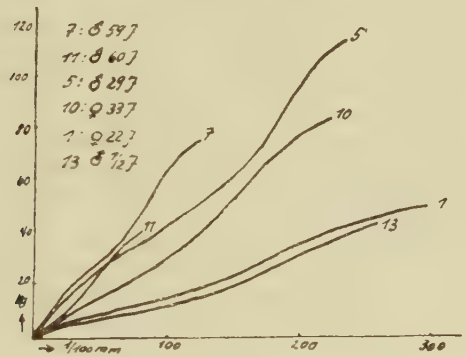
Es sei darauf hingewiesen, daß die Technik auch dieselbe Gesetzmäßigkeit kennt und zur Minderung der Abnutzung Metalle von ver-

schiedener Härte benutzt. Man setzt den Maschinenlagern mit Vorliebe Weichmetalle zu.

Veränderungen sind entsprechend den Untersuchungen am ehesten und stärksten an den Stellen bevorzugter Druckbeanspruchung. Benninghoff (zitiert nach Bär) weist darauf hin, die Pfannenkerne seien die am meisten beanspruchten Teile. Hier komme gallertige Erweichung, mit Wasserzunahme einhergehend, wie auch faserige Erweichung vor. Beobachtungen an Schultergelenkpfannen haben es wahrscheinlich gemacht, daß die gallertige Erweichung in die faserige übergehen kann. Die Tatsache, daß die Pfanne stärkeren Beanspruchungen ausgesetzt ist als der Kopf ergibt sich aus dem Bau der Pfanne. Sie ist zumeist kleiner als der Kopf; die Last wird somit auf eine kleinere Fläche konzentriert. Außerdem wandert die Berührungs-

Abb 3

Spannungsdehnungsdiagramm am Rippenknorpel (nach Göcke)



fläche zwischen Kopf und Pfanne bei Veränderungen der Gelenkstellung auf der Pfanne relativ weniger als auf dem Gelenkkopf. Das hängt damit zusammen, daß der Kopf außer der Rollbewegung zugleich noch eine Schleifbewegung mitmacht. Die Konkavität der Pfanne entspricht nicht ganz der Konvexität des Gelenkkopfes. Somit liegt die Last hauptsächlich in den mittleren Gebieten der Pfanne und die Wanderung der Berührungsfläche mit dem Gelenkkopf bewegt sich mehr oder weniger um die Pfannenmitte. Man erkennt diese Bestimmung des Gelenkknorpels zur größeren Beanspruchung schon an dessen feinerer Struktur, an der besonderen Anordnung der Fasersysteme, die eine möglichst gute Leistung des Knorpels der besonderen mechanischen Beanspruchung gegenüber gewährleisten soll. Es ist eine besondere trajektorielle Anordnung der Faserverläufe vorherrschend.

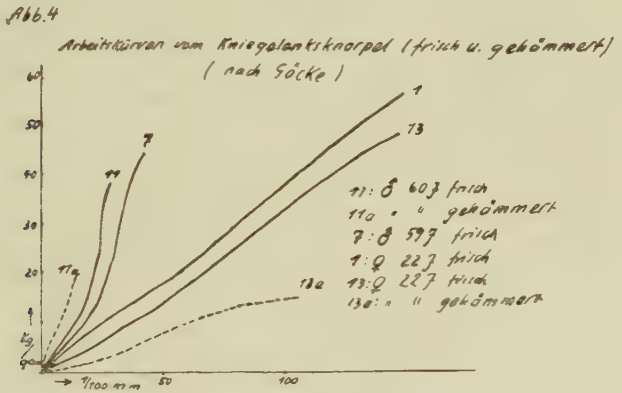
Göcke prüfte ebenfalls wie Bär menschlichen Knorpel auf Dauer- und frequente Stoßbelastung. Er wählte sowohl Rippen- wie Gelenkknorpel. Er schnitt Rippenknorpel in zylinderförmige Stückchen von 10 mm Höhe. Der natürliche Querschnitt wurde erhalten, um nicht den Knorpel durch besondere genaue zylindrische Ausstanzungen der

Knorpelhaut zu berauben und somit den inneren Zusammenhang zu zerstören. (Querschnitt etwa 1 qcm.) — Der Knorpel wurde unter einer 5-Tonnenpresse von Amsler-Laffond belastet. Man steigerte die Belastung von 5 zu 5 kg und maß die Verkürzung in $^1/_{100}$ mm. Der Druck wurde im Spannungs-Dehnungsdiagramm auf die Ordinate, die Verkürzung auf die Abszisse verlegt. Es wurde, wie auch an den Kurven ersichtlich ist (Abb. 3), beim Rippenknorpel keine Proportionalität zwischen Last und Verkürzung festgestellt, das Hook'sche Gesetz ist hier also nicht wirksam. Die Belastungsmöglichkeit des Knorpels liegt zwischen 0 und 100 kg. (Höchste Bruchgrenze des Knorpels = 115, niedrigste = 50 kg, in einer Serie von 14 Untersuchungen festgestellt.) Die Bruchgrenze (Endpunkt des Diagramms) ist klar und eindeutig festzustellen, denn der Knorpel bricht mit einemmal deutlich hörbar ein.

Beim jugendlichen Knorpel verlaufen die Kurven flacher, beim älteren steiler. Die Bruchgrenze liegt beim jugendlichen Knorpel bei verhältnismäßig niedriger Belastung und die Verkürzung ist beträchtlich. Die besten Materialeigenschaften zeigten die Kurven mittleren Alters. (Hohe Bruchgrenze, verhältnismäßig geringe Verkürzung.) Diese Unterschiede sind bedingt durch den verschiedenen Feuchtigkeitsgehalt junger und alter Knorpel. Ähnliche unterschiedliche Verhältnisse ergaben sich bei der Prüfung der Baumaterialien je nach deren Feuchtigkeitsgehalt (z. B. beim Kiefernholz, bei Gesteinsarten usw.) — Isotrope Stoffe haben nach allen Belastungsrichtungen hin gleiche Festigkeit, nicht isotrope Körper nach verschiedenen Richtungen hin verschiedene. Holz z. B. hat in Richtung des Faserverlaufs andere Festigkeit als senkrecht dazu. — Bei den Versuchen prüfte man weiter das Verhalten des Knorpels bei rhythmischen Stoßbelastungen (mit Kruppschem Schlagwerk mit einem Fallbär von 4,185 kg und einer Schlagfrequenz von 100 Schlägen pro Minute und einer Fallhöhe von 4—9 mm). Nach 400 Hammerschlägen mit einer Gesamtarbeit von 6,69 mkg konnte man im Versuche feststellen, daß zwar keine groben Veränderungen sich zeigten, die Materialgüte des Knorpels (Rippenknorpel) aber dennoch gelitten hatte. Während der Knorpel frisch, d. h. ohne diesen Schlagversuchen unterworfen zu sein, eine Bruchgrenze von 90 kg und eine Zusammendrückbarkeit von 3,25 mm zeigte, war nach dem Schlagversuch die Bruchgrenze nunmehr auf 80 und die Zusammendrückbarkeit auf 1,80 mm gesunken. Diese rhythmischen Schlagbelastungen haben bei den Versuchen den Vorteil, daß sie, da sie eine Ähnlichkeit mit den Belastungsarten im wirklichen Leben haben, Ergebnisse vermitteln, die dem vitalen Geschehen näher kommen. Der Knorpel wurde also weniger tragfähig, die Konsistenz fester, das Gefüge zusammengedrängter.

Auch vom Kniegelenksknorpel wurden Belastungsprüfungen gemacht. Grundsätzlich ähneln die Arbeitskurven denen, die am Rippenknorpel erzielt wurden; Göcke hat bei seinen Versuchen eine solche Arbeitskurve vom Kniegelenksknorpel aufgezeichnet (Abb. 4), die die Wirkung eines rhythmischen Dauertraumas durch Stoßbelastung wiedergaben. Es kommt zu einer Summation dieser zahlreichen kleinen unterschwelligen Stöße, die eine, wenn auch nicht grobsichtbare, so aber doch nachweisbare Materialschädigung bewirkt. Auch hier ist wieder der Unterschied zwischen jugendlichen und alten

Knorpel, bedingt durch den verschiedenen Wassergehalt, festzustellen. Der jugendliche Knorpel, der reicher an Wasser ist, wird nach Stoßbelastung weicher, dehnbarer, plastischer. Er büßt an Tragfähigkeit ein. Erwachsener und alter Knorpel werden in ihrem Gefüge dichter. (Das Formänderungsvermögen wird geringer.) Jedoch verlieren auch sie einen Teil ihrer Tragfähigkeit. Diese Tatsache steht im Einklang mit den Vorgängen im praktischen Leben des Sports und der Arbeit. Hier sind es vor allem die jugendlichen Individuen mit unausgereiftem Gewebe, die den degenerativen Prozessen anheimfallen. Naturgemäß verleitet überdies das jugendliche Temperament zum Übermaß der Anstrengung beim Sport, Arbeit, Heeresdienst usw., die geistige und psychische Verfassung zur Unbesonnenheit, zu Draufgängertum und verschwenderischer Verausgabung körperlicher Leistungen.



Bezüglich der elastischen Nachwirkung kam Göcke zu ähnlichen Ergebnissen wie Bär. Ein 30 Minuten belastetes Knorpelstück (1 cm hohes Rippenknorpelstück) zeigt eine elastische Nachwirkung von 60 Minuten Dauer. Verkürzung unter Belastung und Verschwinden der Verkürzung nach Entlastung sind von der Zeit der Belastung abhängig. Am günstigsten sind die Verhältnisse wiederum beim Knorpel des Erwachsenen. Er hat verhälinismäßig große federnde Dehnung (im Moment der Entlastung auftretender Ausgleich der Verkürzung) und verhältnismäßig geringen Prozentsatz an bleibender Dehnung. Die Formveränderungen beim jugendlichen Knorpel sind beträchtlicher als beim Erwachsenen. Beim alten Knorpel überwiegt die bleibende Dehnung wieder über die elastische Dehnung. Die Bruchgefahr nimmt zu. Diese Eigenschaft des reifen Knorpels, Formveränderungen durch federnde Dehnung möglichst auszugleichen, macht ihn gegenüber Schäden im Gegensatz zu jugendlichen und alten Knorpel besonders resistent.

Koch berichtet in seiner Abhandlung: „Über Schädigungen des Gelenkknorpels durch übermäßige Druckeinwirkungen" (Deutsche Zeitschr. f. Chirurgie, Jahrgg. 1929) über seine am Tierversuch (Kaninchen) bei uneröffnetem Gelenk gewonnenen Ergebnisse. Er

stellte zugleich an Hand dieser Ergebnisse praktische Richtlinien für die Chirurgie auf, auf die wir hier nicht einzugehen brauchen. Er erzeugte durch Zusammenpressen der Gelenkenden bei mehrere Wochen dauernden Versuchen einen abnormen Druck auf die Gelenkknorpel und erzielte bei flächenhafter Druckbeanspruchung andere Ergebnisse als bei umschriebener. Unter flächenhafter Beanspruchung ist nicht zu verstehen, daß die Gelenkflächen in ihrer ganzen Ausdehnung einander berühren. Die Druckaufnahmestelle ist vielmehr eine verhältnismäßig kleine. Hier ist das Druckmaximum. Der Druck läßt dann nach den Seiten hin mehr und mehr nach, bis schließlich eine Zone erreicht ist, wo überhaupt keine Druckwirkung von Gelenkfläche auf Gelenkfläche herrscht.

Es ist nämlich nicht so, daß zu der Konvexität des Gelenkkopfes eine entsprechende Konkavität der Gelenkpfanne sich vorfindet, es bestehen vielmehr immer „sphärische Inkongruenzen der Gelenkflächen". Also muß die Druckbelastung in verschiedenen Zonen auch eine verschiedene sein. — So ergab sich bei den Versuchen Kochs, daß nach einer lang dauernden Druckwirkung (teils mehr, teils weniger als drei Wochen) durch Anpressung der Gelenkknorpel aneinander keine sonderlich schwere Veränderung in Form größerer Nekrosen des Knorpels auftraten. Der Knorpel scheint also entsprechend diesen Versuchen eine beträchtliche Widerstandsfähigkeit gegenüber abnormen Dauerdruck zu haben. Jores (zitiert nach Koch) erzeugte dagegen bei jungen Meerschweinchen durch Belastung der Dornfortsätze mit Säckchen, die mit Quecksilber gefüllt waren, schon nach 4 Tagen Schäden, die sich in „Schwund des Knorpels und Ersatz des Knorpels durch Bindegewebe" äußerten. Es handelte sich hier aber um jungen Knorpel, der wie wir ja bereits aus den Ergebnissen der Elastizitätsstudien wissen, weniger widerstandsfähig ist und in seiner Leistung hinter dem Erwachsenenknorpel zurücksteht. Außerdem erschienen Ernährungsstörungen nicht ausgeschlossen. Koch fand, daß nur an der Stelle des stärksten Drucks sich ein kleiner Bezirk nekrotischen Knorpelgewebes bildete, und daß die stärksten Destruktionen in den mittleren Knorpelschichten vorhanden waren. Das subchondrale Mark und der epiphysäre Knochen blieben unverletzt. Die Knorpelstellen, die nicht miteinander in Berührung standen, waren mit Bindegewebe überzogen, die Kapseln waren verdickt und hyperämisiert. Dadurch war die spätere Funktion des Gelenks behindert. Nach Entlastung kam es zu einer Infiltration der geschädigten Knorpelstellen. — Desgleichen führte man eine starke Überdehnung der Kapsel durch Zug herbei. Es kam dabei zu Zerreißungen kleiner Kapselgefäße und zu immer neuen Blutergüssen in den Gelenkspalt. Diese wurden teilweise aufgesaugt, teilweise organisiert. So kam es schon nach Wochen zu einer beträchtlichen bindegewebigen Verödung der Gelenke, zu Verdickungen der Kapsel und Hyperplasie der Synovialis. Es handelte sich nicht um bindegewebige Metaplasie des Knorpels, sondern um aktive, einfache Einwucherung von der Gelenkkapsel her. — Im Gegensatz zur flächenhaften Druckwirkung ergaben Drucke auf umschriebenen Knorpelstellen sehr viel einschneidendere Wirkung. Der Knorpel wurde an der Druckstelle bald nekrotisch und schwand. Statt dessen trat Bindegewebe auf. Dauer und Stärke des Drucks bewirkten naturgemäß Unterschiede im Grad der Zerstörung.

Welche Belastungsvorgänge, welche „Belastungswechsel" sind nun im natürlichen Betriebe des ruhenden und tätigen Bewegungsapparates, im „Dauerbetriebe der organischen Muskelmaschine" wirksam. Hier ergibt sich natürlich ein viel bunteres Bild, eine viel größere Kombinationsmöglichkeit, als es bei den künstlichen Belastungsversuchen je nachgeahmt werden kann. Über die Vorgänge, die sich dabei abspielen, hat Henschen Grundlegendes zusammengestellt. — Die folgenden Erörterungen sind im Wesentlichen an seine Gedankengänge angelehnt. — Der im ruhenden, nicht aktivierten Zustand befindliche Muskel übt naturgemäß eine andere Wirkung auf Knochen und Gelenke aus, wie der tätige, im aktiven Prozeß der Arbeit befindliche Muskel. Beim ersten haben wir als Wirksames nur die vom Muskeltonus bedingte, elastische Spannung, während die tätige Muskulatur, ganz gleich, ob sie willkürlich oder reflektorisch erregt wird, in rhythmische Oszillationen gerät, die sich auf Knochen und Knorpel übertragen. Die bei jeder Muskelaktion auftretenden Aktionsströme erlauben je nach ihrer Beschaffenheit uns einen Einblick in die Größe der Kontraktionen und Spannungen. Diese Vorgänge finden wir bei jeder Haltungs- und Versteifungsinnervation (gleichzeitige und geordnete Kontraktion aller am betreffenden Gelenk beteiligten Muskel). Bei gegen starken Widerstand arbeitenden Muskeln ist die Art der Schwingungen eine besondere, nämlich feine rhythmische Oszillationen und die Zahl nach Schäfer (zitiert nach Henschen) besonders hoch, nämlich bis zu 20 pro Sekunde. Ebenso steigert sich nach Griffith (zitiert nach Henschen) die Zahl der Schwingungen mit dem Anwachsen des Widerstands bis auf 15—18 pro Sekunde. Andere Gelehrte nehmen niedrigere Werte an. Piper (zitiert nach Henschen) nimmt zwei Arten von Rhythmen an, den sogenannten A-Rhythmus und den B-Rhythmus. — Der A-Rhythmus ist kleinfrequent, neuromuskulären Ursprungs, hat große Amplitude und eine Schwingungszahl von 10 — 50 — 75 je nach der Kontraktionsstärke des Muskels. Der B-Rhythmus kommt dagegen durch hochfrequente, elektromuskuläre, oszillatorische Eigenschwingungen des Muskels zustande. Er soll eine Schwingungszahl von 150—180 pro Sekunde haben. Bei Versteifungsinnervation stärksten Grades z. B. bei der die Antagonisten aufs Stärkste beansprucht sind, kommt es auf reflektorischem Wege zu einer alternierenden Pendel- oder Schwingungsaktion der antagonistischen Muskelgruppen. „Durch dieses Auftreten periodisch alternierender Muskeltätigkeiten sind die Schwingungen, in welche ein Glied durch Anstoßen gerät, bei versteifter Haltung frequenter als bei lockerer." (Wachholder.) — Bei stärkster Versteifung kommt es zu einer tremorartigen Muskelaktion, zu einer „geordneten chronisch-rhythmischen Tätigkeit aller synergischen und dazu zu einer reziproken rhythmischen Tätigkeit aller antagonistischen Muskel". (Henschen.) Bei der Gruppierung der Willkürbewegungen hält Henschen sich an die Einteilung von Wachholder. Dieser unterscheidet

I. von Außenkräften unbeeinflußte Bewegungen
   a) rhythmische Hin- und Herbewegungen durch reine Bewegungsinnervation (aktives Gelenkpendel — Henschen),
   b) lockere oder versteifte Einzelbewegungen, welche ein Gemisch von Bewegungs- und Haltungsinnervation sind.

II. Bewegungen unter dem Einfluß von Außenkräften von Effektivkräften.

Die Elementarform der willkürlichen Bewegung ist nach Wachholder nicht, wie man annehmen könnte, die Einzelbewegung, sondern sie ist im Gegenteil nur eine „komplizierte, sekundäre Modifikation" der Hin- und Herbewegung, die die eigentliche Grundform der willkürlichen Bewegung sein soll. Zum Wesen unseres Bewegungsmechanismus gehören aktive und passive Momente, nämlich einerseits „das Bestreben der Glieder, in Elastizitätsschwingungen zu geraten", andererseits „die Neigung zu periodischem Alternieren von Agonisten und Antagonisten". Aus ihrem Zusammenspiel resultiert bei der Ausführung unserer Bewegungen die Neigung zu wiederholten Hin- und Herbewegungen. — Bei dem Zustandekommen und dem Ablauf solcher Hin- und Herbewegungen, solchen „automatischen Gelenkpendels" spielen die Knorpelfedern als treibende Kräfte eine wichtige Rolle. Es kommt wiederholt zum Schwingen aus der Ruhelage heraus und wieder in diese zurück. „Federnd schwingende Bewegung wirkt daher zwanglos und elastisch, jede krampfhafte, stoßweise Bewegung mühevoll und unelastisch. Je stärker die Versteifung, je härter, stoßweiser, rascher und ausgreifender die Gelenke laufen, umso stärker ist die Schwingungsbeanspruchung." (Henschen.) Hier liegt das schädigende Prinzip, das namentlich bei Sport- und Arbeitsschäden wirksam ist. Durch Übersteigerung der Dauerleistung durch überstarke Anstrengung der Muskulatur, des Skeletts und durch extreme Bewegungsformen und Gelenkstellungen über die optimalen Grenzen hinaus, kurz, durch Übernutzung des gesamten „Aktiv- und Passivgewebes" muß es schließlich zu einer Übersteigerung der Schwingungsfestigkeit und damit zu einer Überschreitung der Dauerbruchgrenze kommen. „Das Hochtreiben zu immer größeren Leistungen in Zeit, Maß und Raum, die Beherrschung, Bekämpfung und Überwindung dieser drei Größen stellt an den Körper unerhörte stoffliche und funktionsmechanische Anforderungen. Die von der Natur gesetzten Grenzen werden planmäßig und willensmäßig überschritten, die Sicherungen mit Absicht übergangen. Warnungen des Schmerzes, der Ermüdung und Erschöpfung überhört und mißachtet, obwohl die Bewegungsabläufe folgerichtig nur regelrecht sind, solange sie in den von der Natur vorgeschriebenen optimalen Grenzen liegen." (Baetzner.) Wie enorm die geleistete Arbeit bei solchen sportlichen Anstrengungen ist, beweisen einige Zahlen, die der Arbeit Henschen's entnommen sind. Bei einem Radrennen von 600 km Fahrstrecke beträgt die geleistete Arbeit bei einem mittelstarken Mann 600 000 mkg; bei einem 40-km-Marsch in 10 Stunden mit Pausen zurückgelegt = 200 000 mkg. — Der maximale Minutenrhythmus der Muskulatur des Unterschenkels soll 120 betragen. Die Zahl der Belastungswechsel des Bewegungsapparats beim Schnellauf reicht am Tage an viele Millionen heran. Größere Leistungen über 500 000 mkg können nur dem trainierten Körper zugemutet werden, da nur er möglichst spannungsarm in der natürlichen Elastizitätsrhythmik unter möglichster Ausschaltung störende Mitinnervation zu arbeiten versteht. — Die natürliche elastische Schwingungsrhythmik wird nun sowohl durch lockere bzw. versteifte Einzelbewegungen, als auch durch Einflüsse der Außenwelt gestört. Der Grad der Störungen hinsichtlich der Zeit der Einwirkung und der Kraft der Einwirkung ist für die Entstehung der Schädigungen von Wichtigkeit. Die Landschaftsverhältnisse, die Beschaffenheit des Arbeitsterrains, die Art der Arbeit, die spezielle

Sportart, die übermäßige Beanspruchung hinsichtlich der Dauer und Intensität der Druck und Zugwirkung im Rahmen alltäglicher, betriebsüblicher Vorgänge, falsche unphysiologische Bewegungen im Zustand des Einlernens oder des Übertrainings, in dem die feinere Koordinationsfähigkeit versagt, z. B. plötzliche ungeschickte, stoßende Bewegungen oder jähes Ändern des Tempos und der Richtung, alle derartige Momente zwingen zu übertriebenen Gelenkstellungen, die über das optimale mittlere Bewegungsfeld hinaus getrieben und so schädlich sind; denn es kommt schließlich zur Übernützung der Schwingungsfestigkeit und zur Überschreitung der Dauerbruchgrenze.

Andere Autoren machen noch eine Reihe nicht funktioneller Ursachen für die Sport- und Arbeitsschäden verantwortlich. So sei vor allem das Alter des Individuums für das Entstehen der Schäden von Bedeutung. Es sei vor allem das jugendliche Gewebe, welches diesen Schäden anheimfalle. Aber gerade Baetzner hat auf diese Tatsache hingewiesen. Er ist der Meinung, daß deshalb der Leistungssport und die Betriebsarbeit erst nach abgeschlossener Reifezeit erfolgen soll. Diese Behauptung deckt sich in der Tat mit den Ergebnissen der Belastungsproben, von denen schon vorher die Rede war. Das jugendliche Gelenk z. B. besitzt einerseits noch nicht die volle Betriebsfestigkeit, andererseits fehlt ihm die volle Durchbildung der physiologisch mechanischen Sicherungen und einer kräftesparenden Elastizitätsrhythmik. Das jugendliche Gelenk verträgt diese Übersteigerung seiner Schwingungsbeanspruchung im Beruf und Sport einfach nicht und fällt degenerativen Prozessen in Form der Übernützungsarthrosen und -chondrosen anheim. Der jugendliche Knorpel hat eine andere Struktur und einen anderen chemischen Aufbau wie der ausgewachsene Knorpel. Während Grundsubstanz des erwachsenen Knorpels wahrscheinlich einerseits aus einem besonderen Bälkchensystem und andererseits aus balligen, die Knorpelzellen beherbergenden Chondrinmassen besteht, läßt der jugendliche Knorpel das Bälkchensystem vermissen und besteht im wesentlichen aus einer homogenen Grundsubstanz. — Das Balkennetz des erwachsenen Knorpels besteht aus Albumoid, die Chondrinmasse aus Chondromukoid und Chondroitinschwefelsäure. Der jugendliche Knorpel besitzt also kein Albumoid. Die Struktur ist durch das Fehlen des Balkennetzes beim jugendlichen Knorpel weniger fest. Die Betriebsfestigkeit ist also im Verhältnis zu erwachsenen Knorpel geringer. — Beim Kinde ist außerdem die Fähigkeit zur Versteifungsinnervation im Gegensatz zur rhythmischen Bewegungsinnervation noch nicht völlig entwickelt. Somit ist der Bewegungsapparat des Kindes mehr auf Spielrhythmik eingestellt und im Sinne der Betriebs- und Arbeitsfestigkeit noch nicht völlig funktionstüchtig.

Man führt als Ursache ferner die konstitutionelle Gewebsschwäche an. Hora behauptet, es seien vor allem die Leptosomen, die solche Schäden aufwiesen. Heiß bringt in seiner Abhandlung „Gelenksschädigung, Konstitution und Funktion beim Sport" in Jaensch „Leibesübungen und Körperkonstitution" folgende Tabelle:

Typ	Leptosom-athletisch	Athletisch	Athletisch-pyknisch
Zahl der Geschädigten	25	53	55
Verletzungen	60 %	64 %	60 %
ohne Verletzung	68 %	54 %	54 %

Auch endokrinen Ursachen und schädigenden Einflüssen der Umwelt (Wohnungsverhältnisse, Klima, geographische Lage, Milieu), Stoffwechselstörungen und Gifte (Alkohol, Nikotin, Giftgase), schlechter Ernährung und schließlich Rasseeigentümlichkeiten schreibt man bei der Entstehung der Schäden eine gewisse Rolle zu. Wachsmuth hat bei seinen Untersuchungen beim Militär nachgewiesen, daß die Konstitution keine Rolle spielt. — Der Körper hat ein natürliches Bedürfnis nach kräftesparender Elastizitätsrhythmik. Das zeigt sich sehr deutlich in der Tatsache, daß sich die Übungen unserer zahlreichen gymnastischen Schulen so großer Beliebtheit erfreuen. Sie sollen den Körper mehr und mehr in diese ökonomische, leichte, anmutige, elastische Schwingungsrhythmik der Glieder einarbeiten. Die Berufsbewegungen wirken störend auf diese Elastizitätsrhythmik ein. Durch die sich entgegenstemmenden Widerstände bei Verrichtung der Arbeit wird das natürliche Bewegungsspiel gehemmt, eingeeckt; es kommt oft förmlich zu einer „Einkeilung" des Bewegungsapparates, zu einem Feststellen, dadurch, daß sich der Körper an den zu bewältigenden Gegenständen zu messen hat. (Stützen, Wagenschieben, Bohren, Schleppen, Heben usw.) Die rhythmische Bewegungsinnervation wird durch die Versteifungsinnervation überholt. Es resultiert eine Versteifung des Gelenkspiels, ein Trägerwerden des Bewegungsspiels.

Eine weitgehende Beeinflussung der Betriebs- und Arbeitsfestigkeit im Sinne einer Steigerung kann durch berufliches und sportliches Training erzielt werden. Es kommt zu einer physiologischen und biochemischen Leistungssteigerung, deren höchstes Maß man mit „Übungsfestigkeit" bezeichnen kann. Die Steigerung dieser Vorgänge ins Pathologische nennen wir Übertraining. Sie ist für die Entstehung der degenerativen Schäden von großer Bedeutung, denn die natürlichen Ziele des Trainings werden in übersteigertem Maße verfolgt. Es kommt zur Überbeanspruchung des Körpers hinsichtlich der Kraft und Zeit der Einwirkung, der Körper antwortet schließlich mit allgemeinem oder partiellem Versagen. Die Ziele des Trainings, — Steigerung der Geschicklichkeit — der Koordination durch besseres Einüben des neuromusculären Zusammenspiels, — Ersatz des funktionsuntüchtigen Ballast durch funktionstüchtiges Gewebe, — Trainierung des Kreislaufs und dadurch Hebung der allgemeinen Leistungsfähigkeit im Sinne von Leistungskraft und -zeit, und schließlich Hinaufschrauben der Ermüdungsgrenze, wirken sich im Stadium des Übertrainings teilweise ins Gegenteil aus. Am Knorpel speziell ist beim Training zu erwarten, daß eine Vermehrung und bessere Durchbildung der Elemente stattfindet, die die Struktur des Knorpelgewebes festigen. Das ist das Balkensystem. Es läßt sich denken, daß beim Übertraining dieser Vorgang ins Krankhafte gesteigert wird. Der Knorpel muß eine „physikalisch-chemische Zustandsänderung" erfahren. Er wird härter, zäher, poröser, weil der physiologische, geregelte Wechsel zwischen Belastungsentquellung und Entlastungsquellung (s. weiter oben) gestört ist. Es findet auf diese Weise ein Wasserentzug statt. Die Elastizität der Gelenke läßt nach, das Dispersionsmittel wird nicht mehr völlig aufgenommen und deshalb wird das ursprüngliche Volumen nicht mehr erreicht. Schon die Festigkeitsuntersuchungen am Gelenkknorpel, die im Vergleich zu den Be-

lastungsvorgängen beim natürlichen Gelenkspiel recht primitiv und einseitig sind, gewähren uns einen Einblick in die Entstehungsweise der Sport- und Arbeitsschäden. Wieviel mannigfaltiger aber erscheinen uns die schädigenden Möglichkeiten beim tätigen Bewegungsapparat, auf den eine solche Fülle von statischen und dynamischen Ereignissen einströmt, wie sie im Versuche niemals nachgemacht werden kann! Heute im Zeitraum der Technik und des Sports wird unser Bewegungsapparat vielfach mehr denn je ungewohnten Anforderungen ausgesetzt. Die Zahl der Schäden wuchs. Erfahrungen und Untersuchungen erweiterten sich schließlich zum Gebiet der „funktionellen Pathologie". Henschen teilt im Wesentlichen die Auffassung Baetzners. Letzterer habe die gleichen Veränderungen bei seinen Sport- und Arbeitsarthrosen gefunden, welche er bei den Übernützungsarthrosen der Rekruten, bei den Marscharthrosen und mechanischen Asthritiden der Truppen (Verdickungen der Synovialis mit Auflagerung und Zottenbildung, Auffaserung der Knorpel, umschriebene und generelle Chondropathien) festgestellt habe. Auch er habe umschriebene und allgemeine Knorpelfissuren, Kapselchondromatosen, Osteome, freie Gelenkkörper, Verdickung, Entzündung, Zottenbildung und Adhäsionen der Synovialis), profilierende Bildungen am Knochen aber auch Porosen, Atrophien mit Rarifizierung und Einbrüchen in den subchondralen Knochen gesehen. Er sei mit Baetzner der Ansicht, daß z. B. ein großer Teil der chirurgischen Meniscusveränderungen erst dadurch möglich war, daß es infolge der Materialermüdung vorher zur Degeneration des Meniscusgewebes gekommen sei.

Hinsichtlich der Ursachen der degenerativen Knochenerkrankungen werden ähnlich wie bei den Knorpelerkrankungen zahlreiche Faktoren in Erwägung gezogen, z. B. inkretorische Störungen, mykotisch-embolische Gefäßverschlüsse, Vitaminarmut, konstitutionelle Ursachen und vor allem das Trauma, sowohl als einmalig einwirkendes Ereignis, als auch als intermittierendes Dauertrauma. Jedenfalls ist der Streit, ob es sich bei der Entstehung der lokalen Malazien, z. B. der Perthes'schen und Köhlerschen Erkrankung, der Lunatumnekrose, der Erkrankung des sternalen Schlüsselbeinendes und der Fersenbeinapophyse und der Kallusbildung ohne Fraktur am Schaft der Metatarsalia usw. um Gewalteinwirkungen oder mechanische Überbeanspruchung mit über längere Zeit wirksamer biologischer Reaktion handelt, noch nicht entschieden. Es scheint aber, daß sich mehr und mehr Stimmen erheben, die sich der Ansicht Baetzners anschließen.

Zur Klärung der Verhältnisse beim spongiösen Knochen hat Göcke wichtige Beiträge geliefert. Wie beim Knorpel so ist es auch hier selbstverständlich nicht gleichgültig, ob der Knochen in der Gesamtheit des lebenden Körpers sich befindet oder vom Körper isoliert, d. h. im Laboratoriumsversuch geprüft wird. Schon vor Göcke wurde von mehreren Autoren der Knochen auf seine Elastizität und Festigkeit hin geprüft. Lange (zitiert nach Göcke) machte Versuche an den Rückenwirbeln eines Patienten, der einen Sturz erlitten hatte. Er fand eine Verringerung des Elastizitätskoeffizienten auf 1000—3000 (12 000 ist der gewöhnliche Wert), obwohl ein makroskopisch sichtbares Trauma nicht zu erkennen war. Er erklärte sich diese Tatsache

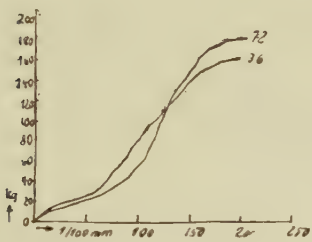
so, daß es durch Stoß zu einer molekularen Umsetzung unterhalb der Bruchgrenze der Knochensubstanz kommt. Durch diese molekulare Beeinflussung und Zustandsänderung werde späteren traumatischen Deformitäten der Boden bereitet. Göcke ist der Ansicht, daß viele Knochendeformitäten erst sekundär im Anschluß an ein Vorstadium submaximaler, traumatischer Reaktionen, die mit der Zeit eine Knochenschädigung verursacht haben, entstanden sind. Er schreibt: „Wenn man nun auch für einen Teil dieser Fälle sich gern durch Rösner und Weil von dem großen bestimmenden Einfluß des Gefäßzustandes und des Blutkreislaufes überzeugen läßt, so gibt es dennoch epiphysenferne, reine Spongiosa-Deformitäten am Schenkelhals und Wirbelkörper, die garnicht anders als eine nach längerer Latentzeit einsetzende biologische Reaktion auf ein Trauma gedeutet werden können, das nach Stärke und Richtung nicht geeignet war, primär irgendwie erkennbare Frakturen zu erzeugen." (Beitr. z. klin. Chirurgie, 1928.) Man kann sich sogar vorstellen, daß die bei diesen Knochenprozessen gefundenen Gefäßstörungen eben auch nur eine Folge der langwirkenden mechanischen Überbeanspruchung sind, also förmlich als eine Teilerscheinung dieser ganzen Vorgänge zu betrachten sind. Es ist durchaus annehmbar, daß es unterhalb der Bruchgrenze der Spongiosa zu einer biologischen Schädigung der Zelle kommt, die sich in einer Änderung der physikalischen Eigenschaften, des Stoffwechsels, einer allgemeinen Insuffiziens dem biologischen Zweck gegenüber äußert, und so der Destruktion Tür und Tor geöffnet wird. Es scheint einen Bereich submaximaler Reize zu geben, dicht unterhalb der Bruchgrenze. Obwohl die Bruchgrenze nicht erreicht wird, wird dennoch eine Störung der Zelltätigkeit bewirkt, ohne daß vorher eine grobtraumatische Gewebszerreißung stattgefunden hat. Die alltäglichen Beanspruchungen des Knochens scheinen sich gewöhnlich unterhalb der Elastizitäts- bzw. Proportionalitätsgrenze abzuspielen. Beanspruchungen bis dicht an die Fließgrenze oder bis an die Elastizitätsgrenze heran scheinen zwar nicht ohne Einfluß zu sein, ändern den Knochen aber nicht so um, daß sich ein physikalisch anders gearteter Körper, praktisch also ein degenerativer Prozeß bildet. Erst das Erreichen der Fließgrenze greift so entscheidend in das biologische Geschehen der Knochenzelle ein, daß die vorgenannten Schädigungen entstehen. Es muß zutiefst eine molekulare Umgruppierung, somit eine Schädigung der lebenden Zelle und weiter eine Änderung der physikalischen Eigenschaften, z. B. der Härte und Festigkeit, Elastizität usw. eintreten.

Für die Untersuchungen am Knochen gelten dieselben technischen Vorbemerkungen, wie sie vorher bei Besprechung der Knorpelfestigkeitsversuche angeführt sind. Göcke verwandte zur Erzielung von Übersichtswerten die 5-Tonnenpresse von Amsler-Laffon, in der der Versuchskörper einem steigenden Druck unterworfen wurde. Die Verkürzung wurde mit einem feinen Meßgerät als Abszisse, die Drucklasten als Ordinaten aufgetragen und so die Arbeitskurven erzielt. Man benutzte zu den Untersuchungen nur unverletzte Wirbel aller Altersstufen, entrindete Spongiosa aus Wirbelkörpern des unteren Femurendes. Dabei wurde natürlich nicht nur reine Knochensubstanz geprüft, sondern es sind auch noch die zwischen dem Bälkchensystem gelegenen Zellen mit ihren wässerigen

Eiweißlösungen als ein völlig anderes Medium am Ergebnis beteiligt. Bei der Kompakta ist diese Nebenwirkung unbedeutend. Somit müssen sich auch bei Spongiosa und Kompakta Unterschiede in den Ergebnissen ergeben.

Zunächst Spannung, Dehnung der Spongiosa: Man nahm einen entrindeten Spongiosawürfel aus dem 2. Lendenwirbel (20×20×20 mm). Bei 50 kg Druck ergab sich eine elastische Verkürzung von etwa 1 mm. Bis zu 170 kg Belastung hatte das Hook'sche Gesetz Gültigkeit, also lag bei 170 kg die Proportionalitätsgrenze. Bei über 180 kg erfolgte der Bruch. (Bruchlast = 45 kgqcm.) Die Kurve hat typische Form, wie man sie bei keinem sonstigen natürlichen oder künstlichen Material findet. Der Anfangsteil ist leicht geschwungen (Abb. 5). Das deutet auf ein hohes Formveränderungsvermögen hin und erklärt sich vielleicht durch die Anweesnheit kolloider Stoffe,

Abb 5



36 Spongiosawürfel Femur 177
72 desgl. 2 Lendenwürfel 277.
(nach Göcke)

von Zellwänden mit wässerigem Inhalt und von Knorpelresten. Junger Knochen und gesunder Knochen zeigen eine ausgeprägtere Schwingung des Anfangsteils als alter bzw. atrophischer Knochen. Bei der Kompakta fehlt sie völlig. Ähnliches Verhalten zeigt natürlich auch der Spongiosa-Knochen aus anderen Skeletteilen z. B. aus dem Oberschenkel. Hier liegt der Proportionalitätsbereich zwischen 45+140 kg mit einer Verkürzung von 0,7 auf 1,5 mm. Die Untersuchungen haben ergeben, daß durch Alter, Geschlecht, Konstitution und ungleichförmigen Aufbau des Knochengewebes eines Individuums, Unterschiede im physikalischen Aufbau und im statisch-dynamischen Verhalten vorhanden sind.

Wie ist es mit der Wirkung r u h e n d e r L a s t e n auf die Spongiosamasse. Göcke benutzte Wirbelspongiosa, die er in der Amslerpresse prüfte. Bei dem 12. Brustwirbel eines 35-jährigen Mannes fand er, daß bei etwa 900 kg die Proportionalitätsgrenze erreicht war und bei 1050 kg der Bruch eintrat. Schickte man dieser Belastung eine dreimalige Vorbelastung von 700 kg je eine Minute voraus, so trat eine Änderung des Formänderungsvermögens ein im Sinne einer Verringerung. Es kam analog den Verhältnissen beim Knorpel einerseits zwar zu einem Dichterwerden des Gefüges, andererseits aber zu einem Verlust an Vollwertigkeit, zu einer Einbuße der elastischen Eigenschaften, d. h. die Gesamttragfähigkeit ließ nach. Das gilt zunächst für Belastungen unterhalb der Proportionalitätsgrenze. Ruhende Lasten oberhalb dieser Grenze aber wirken sich im Sinne

einer Steigerung des beschriebenen Verhaltens aus. Sie vergrößern die Verdichtung und die Verminderung des Formveränderungsvermögens und die Herabsetzung der Bruchgrenze.

Die Wirkungen von stoßweisen Belastungen wurden in zwei Anordnungen geprüft und zwar 1. mit Stoßbelastungen unterhalb der Bruchgrenze, und 2. mit Stoßbelastungen, die die Bruchgrenze überschritten. Man ließ z. B. 10 mal mit je 1/4 Min. Pause eine Stoßbelastung von je 1,217 mkg (20 cm hoher Fall eines 6,085 kg Gewichts) auf einen Wirbelkörper einwirken. Es ergab sich eine Abnahme der Formbarkeit und leichte Verringerung der Bruchfestigkeit. Bei der zweiten Versuchsgruppe ließ man neben anderen Versuchen z. B. einen Schlag von 6,085 mkg einwirken. Es kam zu einem Stauchungsbruch, bei dem der festere abfedernde Rand des Wirbels vom Spongiosakern abgesprengt und eine Verkürzung von 3,5 mm erreicht wurde. Der Wirbelkörper erlitt keine besondere Einbuße seiner Tragfähigkeit, obwohl es doch zu einer makroskopisch sichtbaren Destruktion des Gefüges gekommen war. Göcke weist darauf hin, daß diese Tatsache übereinstimmt mit den Beobachtungen, die man an Unfallverletzten mit Stauchungsbrüchen der Wirbelsäule gemacht hat. Diese Menschen vermögen oft noch Arbeit zu leisten und brechen erst dann zusammen, wenn der Destruktionsprozeß des Knochens und der Abbau der geschädigten Knochenzellen ein unerträgliches Maß erreicht hat. „Die Biologie der Wirbelspongiosa gibt hier noch nicht gelöste Rätsel auf." —

Außerdem wurde ein Versuch angestellt, der zwischen beiden letztgenannten extremen Fällen liegt, bei dem drei Schläge von je 3,04 mkg verabfolgt wurden, die die Bruchgrenze überschritten. Es kam zu einer Höhenverminderung des Wirbels um 3 mm, die wohl darauf zurückzuführen ist, daß die oberflächliche Zone der Gewebszertrümmerung zu einer Härtungs- und Verdichtungszone geworden ist und als Haupteinwirkungsgebiet zu betrachten ist, während eine Tiefenwirkung nur geringen Grads vorzuliegen scheint. Die Tragfähigkeit des Wirbels hat ja nur unbedeutend nachgelassen. Im Schnitt konnte man beweisen, daß die tiefste Zone unverändert blieb. Im wesentlichen liegen hier also ähnliche Ergebnisse wie bei dem Versuch mit ruhenden Lasten vor.

Was ergab die rhythmische Dauerstoßbehandlung? Es besteht ein Unterschied darin, ob man dem Versuchskörper zwischen den Einzelstößen Zeit zur Erholung läßt, oder ob man die Stöße rasch aufeinanderfolgen läßt. Als Instrument wurde das früher schon erwähnte Krupp'sche Dauerschlagwerk benutzt, das eine große Anzahl gleichartiger in kurzer Zeit aufeinanderfolgenden Beanspruchungen ermöglicht, und das mit einem Fallbär von 4,185 kg versehen ist. Die Fallhöhe liegt variierbar zwischen 1—30 mm. Die Schlagfolge beträgt 100 Schläge pro Minute. Die Fallhöhe betrug in allen Versuchen 6,5 mm. Man veränderte nur die Zahl der Stöße. Mit jedem Schlag wurde eine Arbeit von 0,027 mkg geleistet. Man nahm als Versuchskörper halbierte Lendenwirbel. Die Gesamtarbeitsfähigkeit eines halben Lendenwirbels beträgt 0,36 mkg = (1/2 × 400 kg × 1,8 mm). Diese Gesamtarbeitsfähigkeit wird bei einem Einzelschlag (0,027 mkg) nicht überschritten, wohl aber durch Summierung der Einzelschläge. Die Überschreitung der Gesamtarbeitsfähigkeit ist jedenfalls so groß,

daß eine Dauerveränderung des spongiösen Knochens vermutet werden darf. Man nahm bei den Klopfversuchen drei halbierte Lendenwirbel und bearbeitet sie mit 1000, 2000 und 4000 Schlägen. Bei dem Wirbel, der einer Schlagfrequenz von 1000 pro Minute ausgesetzt wurde, bei dem also eine Arbeit von 1000×0,027 mkg = 27 mkg geleistet wurde, entstand schon eine Verdichtung des Gefüges, aber noch keine Herabsetzung der Bruchfestigkeit. Bei 2000 Schlägen mit einer Arbeit von 54 mkg zeigte sich neben einer Verstärkung bei Veränderungen auch schon ein Niedrigwerden der Bruchgrenze. Schwerwiegende Veränderungen wurden aber bei einer Schlagzahl von 4000 (40 Min.) mit einer Gesamtarbeit von 108 mkg erzielt. Sie bestanden in Verminderung der Gesamtelastizität, Gefügelockerung des Knochengewebes und Abnahme der Bruchfestigkeit. Es ist also eine Gesamtmaterialverschlechterung eingetreten. Obwohl keine makroskopisch sichtbare Frakturen der Knochenbälkchen auftraten, wurden die physikalischen Eigenschaften der Versuchskörper wesentlich verändert.

Die Ausbildung von Formveränderungen bedarf beim menschlichen Gewebe einer gewissen Zeit. Bei rascher Be- und Entlastung ist der Versuchskörper nicht imstande zu folgen. Es entsteht also nicht die volle bleibende Dehnung. Andererseits verschwindet bei längerem Ruhen ein Teil der bleibenden Dehnung wieder. Wie wir vorher schon hörten, fand Göcke bei seinen Versuchen am Gelenk- und Rippenknorpel, daß diese Erscheinung der elastischen Nachwirkung eine Abhängigkeit vom Wassergehalt zeige. So auch analog beim Knochen. Göcke machte Versuche in dieser Hinsicht auch an Spongiosawürfeln (aus Femurkondylen herausgesägt), die in Richtung der Hauptbeanspruchung unter Druck gesetzt wurden. Die Formveränderung des Versuchsstücks wurde mit einem Registrierinstrument aufgezeichnet. Die Belastungen dauerten 1/2 Minute, die Entlastungen ebensolange. Während dieser kurzen Einwirkungszeit nimmt der Körper noch nicht die endgültige Form an. Er verkürzt sich bei weiterer Belastung weiter und dehnt sich nach Entlastung (nach 30 Sek.) noch weiter aus. Die elastische Nachwirkung ist dann aber praktisch unbedeutend. Steigert man die Belastung von 5 zu 5 kg/qcm, so ergibt sich, daß erst bei 15 kg/qcm Druck eine bleibende Verkürzung von 0,01 mm sich einstellt, die aber wahrscheinlich verschwinden würde, wenn man dem Versuchskörper noch mehr Zeit zur Dehnung gelassen hätte. Bei weiterer Belastung nehmen Gesamtverkürzung und bleibende Dehnung zu. Bei 65 kg/qcm beginnt der Bruch des Materials.

„Die Belastungen des täglichen Lebens spielen sich bei einem Querschnitt von 35 qcm Femur in Kondylenhöhe ungerechnet den Compactamantel sicher innerhalb der Laststufen 15 bis 20 kg/qcm ab, also in einem Bereich vollkommener Elastizität bei genügender Zeit der Erholung. Höhere Laststufen hinterlassen bei der Spongiosa aber auch bei langer Nachwirkungszeit eine reponible Formveränderung, die nicht ohne Reaktion auf die Knochenzelle bleiben kann. Die Überschreitung der Elastizitätsgrenze bringt uns in den Gefahrenbereich der sekundären Deformitäten durch Zellschädigung." (Göcke.)

Wenn man den Spongiosawürfel durch Belastung vorbehandelt, so werden die Elastizitätsverhältnisse nachträglich verändert. Analoge

Verhältnisse sehen wir schon bei den Knorpelbelastungsversuchen. Der Spongiosawürfel wurde mit einem Hammergewicht von 2,0 kg bearbeitet. Der Hammer fiel aus einer Höhe von 4—6 mm, die vom Würfel geleistete Arbeit beim Auffangen jedes Schlages betrug 0,008 mkg bis 0,012 mkg. Wirksam war erst eine mehrmalige Folge von Schlägen, während ein einzelner Schlag effektlos blieb. Die Belastungen, wie sie hier angewandt wurden, weichen nicht sehr von denen des täglichen Lebens ab. Es trat durch diese „Hämmerung" eine Vergrößerung der Formveränderung ein. 5-kg-Last, die beim unvorbehandelten Würfel keinen bleibenden Verkürzungsrest hinterließen, bewirkten jedoch nach Vorbehandlung einen solchen. Mit wachsenden Laststufen stieg der Verkürzungsrest ebenfalls an. Die Veränderung zeigte sich durch vorausgegangene rhythmische Beanspruchung, also in Abnahme der Tragfähigkeit. Zunahme der bleibenden Verkürzung, alles in allem in einer Verschlechterung der elastischen Materialeigenschaften. Diese Vorgänge wurden in bestimmten Kurven registriert. Der spongiöse Knochen erträgt, — und darin gleicht er dem Gelenkknorpel —, nur schlecht ruhende Lasten. Im Augenblick der Entlastung nach ruhender Belastung schnellt er nicht sofort zur endgültigen Form zurück, sondern er gebraucht über 60 Minuten Erholungszeit, ehe die „elastische Nachwirkung" aufgehoben ist.

Auch hier ist wie beim Knorpel neben der spez. Struktur die Wasserbewegung von Wichtigkeit, indem bei Belastung Flüssigkeit ausgepreßt und bei Entlastung diese wieder resorbiert wird. Bei niedrigen Belastungen (5 kg) sind die Verhältnisse günstiger. Die Elastizität wird wenig beeinträchtigt, die Formveränderung ist unbedeutend, die Rückkehr zur ursprünglichen Form geht nach Belastung verhältnismäßig schnell vor sich. Wir können uns wohl vorstellen, daß bei der wechselvollen Folge unphysiologischer oder überphysiologischer Beanspruchung des täglichen Lebens, beim Sport, Heeresdienst oder bei der Arbeit es durch Summierung der Reize zu einer physikalischen Gewebsveränderung und damit zu degenerativen Prozessen kommen kann. Göcke sagt: „Durch die Hypothese eines Christen Lange über die Entstehung der traumatischen Osteomalacie ist vorstehend beschriebene Versuchsreihe angeregt worden. Sie konnte keine Bestätigung der Ansicht Langes bringen, daß eine einmalige Stoßbelastung spongiösen Knochengewebes die von ihm vorausgesetzte Knochenerweichung verursachen kann. Jedoch haben die Versuchsergebnisse es wahrscheinlich gemacht, daß auch am gesunden Spongiosagewebe mechanische Alteration die wichtigste Ursache für sekundäre Deformitäten abgibt. Die Veränderung der elastischen Eigenschaften, die nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze eintritt, stellt den physikalischen Ausdruck einer Zellschädigung dar, die auch an totem Gewebe sich noch nachahmen läßt. Bleibende Verkürzung der Versuchskörper, Fehlstellungen des lebenden Knochens sind oft die offensichtlichen Wirkungen einer Überschreitung der für jedes Individuum und Gewebe spezifisch abweichenden Elastizitätsgrenze durch einmalige oder rhythmisch wiederholte mechanische Reize."

Weitere, die Materialeigenschaften des Knochens betreffende Untersuchungen sind von Rößle angestellt worden. Rößle versuchte

zugleich einige konstitutionspathologische Beziehungen herauszufinden, kam aber in dieser Hinsicht noch nicht zu einem abschließenden Ergebnis. „Es ergaben sich, wie es übrigens aus vielen anderen der im vorigen von mir angeführten Arbeiten, im besonderen auch aus denen von Göcke hervorgeht, so beträchtliche individuelle Verschiedenheiten bei sonst nach üblichen Gesichtspunkten vorgenommenen Gruppierungen, daß vorläufig kein anderer Schluß möglich erscheint, als daß die spezifischen Qualitäten des Knochens eine Eigenschaft der Person für sich sind" (Rößle, die mechan. Prüfg. menschl. Gewebe).

Die Versuche betrafen 1. die Knochenhärte, und 2. die Schlagfestigkeit des Knochens.

Zur Bestimmung der Härte benutzte er eine Kugeldruckpresse, nachdem die Ritzmethoden bei der Inhomogenität der geschliffenen Kompakta sich nicht bewährt hatten. Das Prinzip des Instruments besteht darin, daß eine sehr harte Stahlkugel von 1,6 mm Durchmesser mit bekannter Belastung in den Versuchskörper eingedrückt wird. Das Maß der Tiefe des Eindrucks bzw. der Durchmesser der erzeugten Delle erlaubt einen Rückschluß auf die Härte des Materials. Man benutzte zur Berechnung der Härte die E. Meyersche Formel

$$\frac{P}{\frac{\pi}{4} \times d^2}$$

(P ist die jeweilige Belastungsgröße, d ist der Durchmesser der Delle.) Es ergab sich bei über 100 Prüfungen, daß die Härte des Knochens ziemlich einheitlich ist. Nur der kindliche Knochen hat einen etwas geringeren Härtegrad. Beziehungen der Härte zum Gewicht und zur Länge des Körpers oder zu bestimmten Erkrankungen wurden nicht festgestellt. Der Rößle-Schüler Lexer beschäftigte sich mit der Frage, worauf die Knochenhärte beruhe? Bei phosphorarm gefütterten Tieren wurde mittels der Kugelpresse deutlich verminderte Knochenhärte gefunden, dagegen blieben die beim Menschen vorkommenden Schwankungen des Kalkgehalts ohne Einwirkung auf die Knochenhärte. Auch ist die Knochenhärte unabhängig von der Belastung. Das Skelett paßt sich den Mehranforderungen nur durch quantitativen, nicht durch qualitativen Einsatz an. Rößle nimmt, sofern Unterschiede in der Härte zu erkennen sind, eher primär konstitutionelle Momente als „degenerative Veränderungen hinsichtlich der Mineralisation" an. Darin findet er auch die Erklärung für die Tatsache, daß Tuberkulöse weichere Knochen haben als Carcinomkranke, oder daß grobknochige Individuen mit untersetzter Statur und elfenbeinartig dichten Knochen mit dicker Kompakta und engem Knochenmarkkanal eine relativ hohe Knochenhärte haben.

Eine zweite Versuchsreihe sollte der Feststellung der Schlagfestigkeit des Knochens dienen. Die Versuche wurden hauptsächlich am Femurknochen unternommen. Man stellte zunächst Kopien aus Holz und Gußeisen her, um zu erproben, ob bei der Markraumbildung und der unregelmäßigen Form des Femur und die dadurch sich ergebende Verschiedenheit in der Befestigung auf dem Widerlager die Berechnungen gestört würden. Es ergaben sich bei den Prüfungen an den Kopien in dieser Hinsicht nur unbedeutende Einflüsse. Als Instrument verwendete man den sogenannten Pendelschlaghammer, der

auch in der Technik gebraucht wird. Der Hammer hat ein bekanntes Gewicht und gleichbleibende Stiellänge. Er pendelt aus gleichbleibender Höhe gekantet gegen das Probestück quer zu dessen Längsachse, das dort, wo der Hammer die größte Geschwindigkeit hat oder wo die Ruhelage des Hammerpendels ist, an einem Widerlager befestigt ist. Wird das Stück beim Anprall des Hammers zerschlagen, so pendelt der Hammer noch soweit über die Vertikallage hinaus, als ihm die noch übrig gebliebene Energie nach Abzug der vom Probestück verbrauchten Energie erlaubt. Die vom Knochen bis zum Zerspringen aufgenommene Energiegröße erhält man demnach aus der Differenz zwischen der ursprünglichen Energie und der Restenergie, die sich aus der Steighöhe des Hammers nach Durchschlagen des Probestücks ergibt. Berechnet man die Schlagarbeit pro qcm unter Berücksichtigung des Querschnitts und des spezifischen Gewichts des Probestücks, so erhält man die „spezifische Schlagarbeit". Sie ist ein Maßstab für die „Schlagzähigkeit". Rößle nahm als Abstand der beiden Widerlagerbacken 41 mm und Femurstücke von 60 bis 61 mm. Im ganzen wurden 166 Schlagversuche angestellt. Das Hammergewicht betrug 7,932 kg, die Fallhöhe 1,2608 m, der Pendelradius 650 mm. Bei dieser Schlagkraft wurden fast alle Knochen durchschlagen. Ebenso wie die Knochenhärte hat auch die Schlagfestigkeit keine Korrelation zu Form, Größe und spezifischem Gewicht des Knochens. Als mittlere Schlagzähigkeit nimmt Rößle den Versuchen entsprechend für die Norm etwa 0,40—0,50 mkg/qcm an. Der Knochen des Kindes erreicht schon im ersten Jahrzehnt die durchschnittliche Schlagfestigkeit. Diese Stöße sind also so stark, daß sie bereits ein chirurgisches Ereignis erzeugen. Die die degenerativen Veränderungen verursachenden Stöße müssen erheblich unterhalb dieser Grenze liegen.

Am Knochen sind weiter Versuche und Feststellungen gemacht worden, wie wir sie beim Knorpel nicht gesehen haben. Sie sind eine für das Knochensystem, das ja ein starres System ist, spezifische Methode und lassen sich beim Knorpel mit seiner völlig anderen Struktur und Bestimmung in derselben Weise wohl nicht nachmachen. Die hier in Frage kommenden Versuche wurden hauptsächlich von Küntscher geführt. Die folgenden Gedankengänge sind im Wesentlichen seiner Arbeit „Spannungsverteilung am Schenkelhals" (Archiv für klin. Chirurgie 1936, 185) entnommen. Bei einem unter irgend einer Kraft stehenden Körper verteilt sich die Kraft nicht in einem diffusen, gleichmäßigen Fluß über den ganzen Körper, sondern sie verläuft in ganz bestimmten Bahnen in, man könnte sagen „Sammelstraßen". Die Bahnen laufen nicht immer in gleichmäßigen Abständen. In bestimmten Gegenden des belasteten Körpers verdichten sich die Kraftbahnen, es kommt zu Anhäufungen von Spannungen, zu sogenannten „Spannugsspitzen". An den Orten, die diesen Spannungsspitzen entsprechen, müssen notwendigerweise alle statischen und dynamischen Vorgänge in verstärktem Maße auftreten, d. h. es muß an diesen Stellen, sofern es sich um krankhaftes Geschehen handelt, die Auswirkung dieses Krankheitsprozesses ersichtlich sein, sie muß also nach Lage und Verlauf den Spannungssitzen entsprechen. Küntscher konnte nachweisen, daß die meisten Umbauzonen des Knochens diesen Stellen höchster Druck- oder Zugspannungen entsprechen. Es

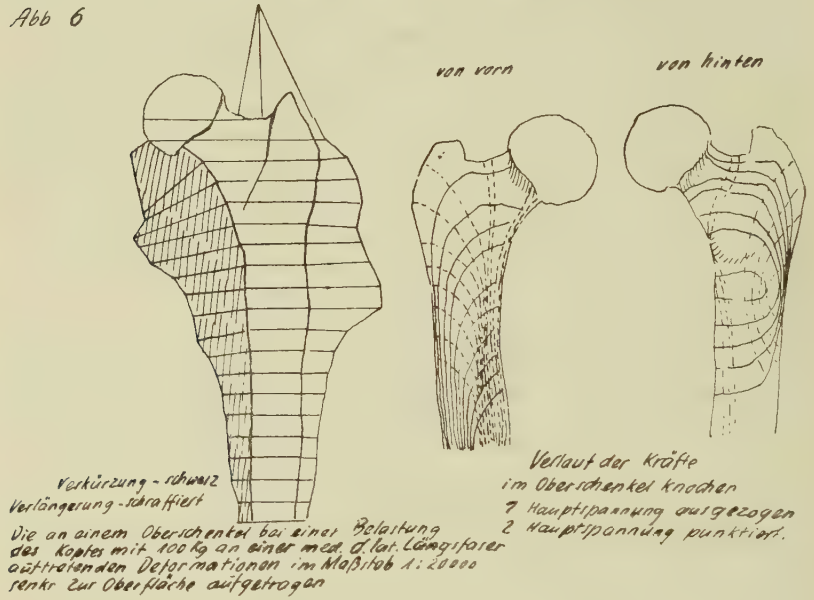
wurde weiter festgestellt, daß eine weitgehende Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der Kräfte und dem Bau des Knochens besteht. Das trifft z. B. für die Trajektoren zu. Der Bau, meint Küntscher, sei abhängig von der Fukntion, müsse also in Richtung des Kraftlinienverlaufs angeordnet sein.

Man hat zur Darstellung des Kräfteverlaufs ein einfaches, aber sinnreiches Verfahren benutzt, das sogenannte „Dehnungslinienverfahren" von Dietrich und Lehr, das namentlich im Flugzeugmotorenbau angewandt wird. Man belegte den Knochen mit einer dünnen Schicht Kolophonium (indem man den Knochen in flüssiges Kolophonium tauchte). An den Stellen der stärksten Dehnungen zeigten sich feine Risse, die senkrecht zur Richtung der Zugspannung verliefen, da es sich ja um feine Trennungsbrüche handelte. In ähnlicher Weise ließen sich auch die Druckkräfte darstellen. Man belastete den Knochen einfach vor dem Erhärten des Kolophoniumüberzugs. Dann entlastete man. Es mußten notwendigerweise an jenen Stellen Risse entstehen, die vor dem Erhärten der Schicht der größten Druckwirkung ausgesetzt waren. Die zuerst auftretenden Dehnungsrisse mußten also den Stellen der stärksten Dehnungen entsprechen. Man stellte zugleich das Wirksamsein des Hook'schen Gesetzes fest. (Dehnung = proportional der wirksamen Kraft). Die Größe und Darstellung der Risse ließ einen Rückschluß auf die Größe der wirksamen Kräfte zu, d. h. die Stellen der stärksten Dehnung waren Stellen der größten Beanspruchung.

Die auf den Oberschenkelknochen z. B. einwirkenden Kräfte werden verursacht durch den Zug der Muskulatur und die dynamische Beanspruchung bei den willkürlichen Bewegungen, beim Gehen, Laufen, Springen usw. Sie rufen eine Druckwirkung hervor in der Längsrichtung des Knochens und ihr Angriffspunkt liegt in den Gelenkflächen. Der Knochen muß demnach mehr auf Druckwirkung hin konstruiert sein. Die Liniensysteme in der Kolophoniumschicht zeigten auch, daß an den Stellen höchster Druckspannungen zugleich Zugdehnungslinien auftraten. Sie erklären sich durch das gleichzeitige Auftreten von zusätzlichen Kräften, sogenannten Querkräften. So verlaufen die Druckspannungen senkrecht zu den Zugdehnungen, es sind also zwei aufeinander senkrecht stehende Spannungen vorhanden. Diesen Zustand nennt man zweiachsigen Spannungszustand. Dieser zweiachsige Spannungszustand ist bei den statischen und dynamischen Vorgängen am Knochen von großer Bedeutung und trägt vielleicht dazu bei, bei pathologischen Beanspruchungen degenerative Prozesse hinsichtlich Progredienz und Ausdehnung nur noch zu unterstützen. Man hat auch eine Beziehung zwischen Zug- und Druckkräften und dem konstruktiv-architektonischen Aufbau des Knochens entdeckt. Die Ausstrahlungsstellen der Trajektorien auf die Knochenoberfläche decken sich mit den Spannungsspitzen. (Am Schenkelhals liegen z. B. die Verhältnisse so: dort, wo der Bogen des Trajektorienzuges die Oberfläche des Schenkelhalses erreicht, liegt die erste Zugspannungsspitze, am Fuße des Bogens die zweite Zugspannungsspitze; am Fußpunkt des geraden Bälkchenzugs, der die Druckspannungen überträgt, haben wir die Druckspannungsspitze.

Die Größe der Dehnungen und Spannungen kann mit diesem Verfahren nicht beurteilt werden, wohl aber mit Hilfe feiner Apparate, der sogenannten Tensometer (nach Huggenberger, nach Okhuizen

usw.). Die bei natürlicher Belastung auftretenden Dehnungen und Spannungen sind sehr klein. Durch Hebelübertragung werden die Dehnungen bei diesen Apparaten stark vergrößert dargestellt. Man brachte sog. „Dehnungsreliefs" zur Darstellung (vom Oberschenkel). Verkürzungen bestimmter Gebiete werden durch Druckspannungen, Verlängerungen durch Zugspannungen hervorgerufen. Das Dehnungsrelief gibt daher einen Einblick in die am Knochen auftretenden Spannungsvorgänge. So werden die größten Deformitäten immer auch an jenen Stellen gefunden, wo die ersten Risse in der Kolophoniumschicht auftraten.



Am Dehnungsrelief kann man z. B. die Tatsache sehr gut beobachten, daß am Schenkelhals die Spannungen sich sehr zusammendrängen. Die stärksten Dehnungen im Dehnungsrelief sind identisch mit den Zugkräften, die stärksten Verkürzungen mit den Druckkräften.

Entsprechend dem Hook'schen Gesetz ergab sich, daß die Deformation direkt proportional der Belastung ist. Man hat weiter versucht herauszubekommen, welche Spannungen den ermittelten Dehnungen entsprechen. Man hat dazu Eichversuche anstellen müssen an Körpern, die aus der Knochensubstanz ausgeschnitten wurden. Natürlich sind die erzielten Werte nur ungefähre. Eine Längenveränderung des 10 mm langen Stücks durch Einwirkung von Druck oder Zug tritt bei einer Spannung von 0,35—0,4 kg/qmm auf. Bei Belastung von 200 kg erzielt man eine Dehnung von $\frac{6,5}{1000}$ Millimeter = einer Spannung von 2,3 kg/qmm. (6,5 · 0,35). Die Zugfestigkeit beträgt 12—14 kg/qmm (bei normalem Knochen).

Baetzner bringt bei der Erörterung der Frage: „Das mechanische Gewebe und seine Festigkeit" neue allgemeine Richtlinien, die uns dem Verständnis der funktionspathologischen Vorgänge näher bringen. Er geht von der Annahme aus, daß das menschliche Aktiv- und Passivgewebe den Gesetzen der Statik und Dynamik unterworfen ist. Unter dem Einfluß der auf das Gewebe wirkenden Energien fügen sich die Strukturelemente dem Prinzip der Ordnung und Richtung. Die funktionellen Vorgänge wirken sich ordnend und richtend innerhalb von „Einflußfeldern und Einflußebenen" aus. Ähnliche Vorgänge haben wir in der Welt des Leblosen z. B. der Mineralien. Die Gesteine richten und ordnen ihr Gefüge bei der Kristallisation unter dem Einfluß innerer Gesetzmäßigkeiten und der Umgebung. Bei sportlicher und beruflicher Übung kommt es zur Durchbildung besonderer Richtungskombinationen, wie sie sich notwendig aus der Beanspruchung und Art der Sport- bzw. Arbeitsübung ergeben. Während nun einerseits eine besondere Ausrichtung erfolgt, muß andererseits eine „latent dynamische Richtungsinsuffizienz" entstehen. Das ist z. B. beim Knochen der Fall, der im allgemeinen durch die spezifische Beanspruchung auf Druck und Zug in Richtung der Körperlängsachse eine dementsprechende einseitige Ausrichtung des Gefüges erfährt und senkrecht auf diese Richtung einwirkenden Kräften am wenigsten gewachsen ist. Wenn die Energien nun gerade in diesen Richtungen angreifen, in denen das Gefüge nicht oder nur sehr wenig ausgerichtet ist, so wird hier am ehesten sich ein Versagen zeigen. „Diese Wechselbeziehungen sind aufs feinste reguliert, jede anders geartete Beeinflussung kann den fein eingespielten Mechanismus in Unordnung bringen. Das neuromuskuläre Zusammenspiel kann durch ein solches Geschehen einschneidend gestört werden, so daß der Sportler seine Höchstleistung einbüßt" (Baetzner). Im Stadium der Ermüdung oder des Übertrainings, wenn das feine Koordinationsvermögen versagt, kann es zu einer Disharmonie zwischen den vorhandenen Richtungskombinationen und den jeweils erfolgenden Beanspruchungen kommen. Eine Schädigung durch solche funktionspathologischen Vorgänge ist dann leicht denkbar. Die spezialisierten Sportarten scheinen bei der Einseitigkeit des Bewegungsspiels mit der Zeit also zur Ausbildung einer spezifischen Richtung und Ordnung des Bewegungsapparats, zu einer „Gleichrichtung der Energielinien und Kraftlinien" auf Kosten anderer Richtungskombinationen im mechanischen Gewebe zu führen. Solche Sportler sollen sich mehr als jeder andere anders gearteten Beanspruchungen entziehen. — So reiht sich ein schadhaftes Geschehen an das andere und schließlich liegen als letztes Glied dieser Kette von unmerklichen Ereignissen degenerative und produktive Schäden vor, wie z. B. am Knochen die lokalen Osteomalazien der Handwurzelknochen bei Kugelstoßern, Tennisspielern, Turnern, Handballern und Arbeitern mit Preßlufthämmern und -bohrern, Schmieden und Schlossern, die degenerativen Prozesse an den Metatarsen bei Springern und Läufern, ferner die Osteoporosen am Femurschaft, die degenerativen Prozesse an der Tuberositas tibia, die Militärdienstschäden an der Tibia, Fibula und am Mttelfußknochen nach Märschen, Sprüngen usw., die Knochenwucherungen an der Tub. tibiae und der Nachbarschaft und an den Kondylen, die Knochensporne und freien Gelenkkörper.

Die Untersuchungsergebnisse über die statisch-dynamischen, die funktionspathologischen Vorgänge und deren Einflüsse auf das zellbiologische Geschehen im Körper stehen im Einklang mit den im technischen Versuch erzielten Resultaten. Man hat versucht, die statischen und dynamischen Vorgänge, die im Mechanismus des Bewegungsapparats eine Rolle spielen, bei den Festigkeitsprüfungen nachzuahmen. Man hat dabei auch Kräfte verwandt, die keinen Bruch und dennoch eine Schädigung des Gewebes verursachten. Diese Kräfte müssen mit gleicher Intensität auch am Bewegungsapparat wirksam sein. Ohne daß man ein greifbares Trauma erkennen konnte, kam es bei den im Festigkeitsversuch erprobten Gewebsstücken unter bestimmten Bedingungen zu Schäden, die sich in Abnahme der Formbarkeit und Verringerung der Bruchfestigkeit äußerten. Wie viel größer ist beim lebenden Gewebe, bei dem die statisch-dynamischen Vorgänge unvergleichlich komplizierter und mannigfaltiger sind, die Möglichkeit schädlicher Vorgänge. — Wir sehen z. B., daß bei stoßweisen Belastungen schon bei Kräften, die unterhalb der Elastizitätsgrenze lagen, eine Abnahme der Formbarkeit und Herabsetzung der Bruchgrenze erzielt wurde. Im praktischen Leben des Sports kommt eine derartige Beanspruchungsweise häufig vor. Beim Fußballer z. B. werden Knochen und Gelenke der unteren Gliedmaßen während des Spiels beim Stoßen und Abfangen des Balls und bei den vielfachen extremen Gelenkstellungen, beim „Foppen" sehr oft plötzlichen unmotivierten Stößen ausgesetzt. Es kommt zu einem völlig unphysiologischen Bewegungsablauf. So entstehen degenerative und produktive Knorpelveränderungen, deformierte Arthropathien, freie Gelenkkörper, Knochenaufhellungen und -wucherungen usw. Ähnliches sehen wir bei Rasensportlern, Radrennfahrern, Sportlehrern usw. Der Tennissport z. B. bewirkt parallele Schäden an der oberen Extremität. Durch ein möglichst geschicktes Handhaben des Schlägers wird das Ellbogen- und Handwurzelgelenk in zahlreiche extreme Stellungen gezwungen. Denken wir weiter an die überstarke Stoßbeanspruchung beim Boxen, bei Fall- und Liegestützübungen, beim Schieben der Hunde bei den Bergleuten, beim Barrenturnen usw. Wir sehen als Endergebnis dieser pathologischen Beanspruchung arthrotische Veränderungen der Fingergrundgelenke, der Handwurzel- und Ellbogengelenke, freie Gelenkkörper, Osteomalacien usw. Hierher gehören auch die Marschfrakturen, die im Gefolge längerer Märsche oder anstrengenden Exerzierdienstes entstehen. Durch Abplattung des ermüdeten Fußgelenkes kommt es zu einer veränderten Statik. Es stellen sich Schäden meistens im 2. und 3. Mittelfußknochen ein. Der Exerzierdienst auf den harten Kasernenhöfen bringt eine starke Belastung der unteren Gliedmaßen mit sich. Mannigfaltige Stoßwirkungen schalten sich ein. Es entsteht ein völlig unphysiologischer Bewegungsablauf. Schienbeinschäden sind deshalb sehr häufig. Beim Dauerhocken und Dauerkniebeugen kommt es zu Schäden des Wadenbeins, bei Gepäckmärschen zu Fersenbeinerkrankungen. Der rhythmische Dauerstoß ist das wirksame Prinzip bei den Schäden der Bergleute, durch Bedienen der Preßluftinstrumente. So könnte man noch zahlreiche Beispiele anführen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen über das funktionspathologische Geschehen und dessen Einfluß auf die biologischen Vorgänge im Stützgewebe erscheinen noch sehr lückenhaft. Es fehlt einerseits

die systematische Durchprüfung der Festigkeitseigenschaften der Gewebe an allen in Frage kommenden Körperregionen und andererseits eine genaue Erforschung der einzelnen technologischen, statisch-dynamischen Vorgänge und Abläufe speziell bei dieser oder jener Erkrankung. Beim Studium entsprechender Literatur von maßgebenden Autoren aber kann man feststellen, daß die früher umstrittene Auffassung vom traumalosen krankmachenden Geschehen am Bewegungsapparat mehr und mehr Anhänger gewinnt. Man erkennt heute an, daß allein falsche statisch-dynamische Abläufe mit der Zeit zu Schäden führen können, für derne Entstehungsweise man lange Zeit keine andere kannte, als die traumatische. Man weiß heute sogar, daß viel unerklärliche traumatisch-chirurgische Ereignisse lediglich eine letzte Aufpropfung auf Prozesse waren, die längst schon als „funktionsbedingter, degenerativer Schaden" in Entwicklung waren, ohne daß es zu einem sicht- und spürbaren traumatischen Ereignis gekommen war.

Schrifttum.

Bär: Elastizitätsprüfungen der Gelenkknorpel (Ronas Arch. f. Entw.-Mech. Bd. 108. H. 4. 1926).

Baetzner: Sport- und Arbeitsschäden (Leipzig 1936).

Blenke: Über Sportschäden der Gelenke (Zbl. Chir. 1930).

Fick: Anatomie und Mechanik der Gelenke (Leipzig 1927).

Galka: Grundriß der Festigkeitslehre.

Göcke: Elastizitätsstudien am jungen und alten Gelenkknorpel (Vhdlg. d. 22. Kong. d. orthop. Gesellsch.).

—, Das Verhalten des spongiösen Knochens im Druck- und Schlagversuch (Zschr. f. orthop. Chirurgie — 1926).

—, Beitrag zur Druckfestigkeit d. spong. Knochens (Bruns Beitr. zur klin. Chirurg. Bd. 143 — 1928).

Henschen: Die mechan. Arbeitsschäden d. Kniegelenks und d. Meniscen in sportl., milit. u. berufl. Betätigung durch Übernützung der statischen, dynamischen u. d. Schwingungselastizität (Schweizerische medizin. Wochenschr. Jahrgg. 59).

Heiß: Gelenkschädigung, Konstitution u. Funktion beim Sport, in: Jaensch, Leibesübungen und Körperkonstitution.

Knoll: Zur Frage d. Sportschäden (D. med. Wochenschr. 1933).

Koch: Über Schädigungen d. Gelenkknorpel durch übermäßige Druckeinwirkungen (D. Ztschr. f. Chirurgie 1929).

Magnus: Handbuch d. gesamten Unfallheilkunde.

Müller: D. Umbau (Jahreskurse äztl. Fortbildg. 1930).

Remmer-Andreesen: Das reizempfindliche Kniegelenk.

Röllgen: Pathol. anatom. Untersuchung von Meniscen bei Sportschäden (D. Ztschr f. Chirurgie — 1928).

Rössle: Die mechan. Prüfung menschl. Gewebes (Jahreskurse ärztl. Fortbildg. 1930).

Wachsmuth: Über Dienstschäden am Bewegungsapparat, in: Militärarzt" 1937.

Lebenslauf.

Am 13. Dezember 1908 wurde ich zu Wanne-Eickel als Sohn des Zechenbeamten Wendelin Gram geboren. Ich besuchte zunächst die Grundschule und vom 10. Lebensjahr ab das Realgymnasium zu Wanne-Eickel. Ostern 1929 erhielt ich das Reifezeugnis. Ich studierte zunächst 2 Jahre künstlerisches Lehramt an der Universität zu Münster und der Kunstakademie zu Königsberg. 1931 ging ich zum medizinischen Studium über. Die ärztliche Vorprüfung bestand ich an der Universität zu Münster, das Staatsexamen im März 1927 an der Universität zu Berlin. Danach war ich zunächst 1 Jahr an der inneren Abteilung des St. Maria-Viktoria-Krankenhauses in Berlin als Praktikant tätig. Die ärztliche Bestallung erhielt ich am 15. März 1938. Von dieser Zeit ab bis heute bin ich Assistenzarzt im St.-Maria-Viktoria-Krankenhaus.

An dieser Stelle obliegt mir die angenehme Pflicht, Herrn Prof. Dr. med. Baetzner für die Überlassung des Themas und seine Mühewaltung zu danken.